

Université de Montréal

L'écomorphologie des suidés d'élevages au Québec : impact de la mobilité sur la forme de  
l'astragale

par Maxime Vaillancourt

Mémoire présenté à la Faculté des Arts et des Sciences  
en vue de l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M. Sc.)  
en Anthropologie

Août 2017

© , Maxime Vaillancourt



## Résumé

Cette recherche constitue une étude écomorphologique de trois groupes de suidés d'élevage du Québec avec comme objectif l'étude de l'impact de la mobilité comme facteur influant le développement de la morphologie de l'astragale (tarse). Nous cherchons à déterminer s'il est possible d'observer des différences statistiquement significatives dans les formes de l'os selon le taux de mobilité à l'aide d'analyses discriminantes linéaires et de données morphométriques. Le taux de mobilité étant influencé hypothétiquement par le degré d'ouverture de l'environnement, cette étude nous permettra également d'apporter des réflexions sur les résultats obtenus par Laura Bishop (1994). Une exploration de collecte d'information sur modèles tridimensionnels numériques est également proposée. Nous arrivons à la conclusion que le taux de mobilité a un impact statistiquement significatif et mesurable sur la morphologie de l'astragale chez les suidés étudiés. Les analyses discriminantes linéaires constituent un puissant outil de classification des individus selon leur taux de mobilité, et ce à l'aide d'un nombre réduit et aisément reproduit de variables. Les résultats de cette recherche ouvrent la porte à des interprétations couvrant l'entièreté du registre archéozoologique associé à la lignée *Homo*. Les sujets de la domestication, des méthodes d'élevage, de l'abondance environnementale, et même des relations proies-prédateurs sont des ouvertures potentielles à cette recherche

**Mots-clés :** astragale, écomorphologie, élevage, mobilité, morphologie, os, porc, sanglier, suidé, tarse, zooarchéologie, archéologie

# Abstract

This research consists of an ecomorphological study of three groups of suids farmed in Quebec with the aim of identifying the impact of mobility as a factor influencing the development of the morphology of the astragalus (tarsus). We observe significative statistical differences in bone shape as a function of mobility using morphometric analysis and linear discriminant analysis. The hypothetical link between mobility and environmental openness - i.e., vegetation nature and cover density - allows us to use these results to comment on the interpretations and methods proposed by Laura Bishop (1994). An exploration of data collection methods on digital 3D models is also proposed. We conclude that the degree of mobility has a statistically significant impact on the morphology of the astragalus in suids. The linear discriminant analysis is a powerful classification tool for determining the levels of mobility in suids, using a small number of easily reproduced variables. The results of this research offer a means of paleoenvironmental reconstruction, for example in contexts associated with the Homo lineage. The subjects of domestication, husbandry, environmental turnout, and predator-prey interactions are all potential research outcomes of this work.

**Keywords** : astragalus, boar, bone, ecomorphology, farming, mobility, morphology, porc, suids, tarsal, zooarchaeology, archaeology

# Table des matières

Résumé .....	i
Abstract .....	ii
Table des matières .....	iii
Liste des tableaux .....	v
Liste des figures .....	vii
Liste des abréviations .....	viii
Remerciements .....	ix
Introduction .....	1
<b>Chapitre 1 — Cadre de la recherche .....</b>	<b>3</b>
1.1 Écomorphologie .....	3
1.1.1 Concepts généraux .....	4
1.1.1.1 Concepts liés à l'écologie .....	4
1.1.1.2 Concepts liés au sujet observé .....	5
1.2 Facteurs influant sur la mobilité .....	6
1.3 Application de l'écomorphologie en archéozoologie .....	8
1.4 Travaux de Laura C. Bishop .....	9
1.5 Choix de l'astragale .....	10
1.6 Ouvertures de la recherche .....	12
<b>Chapitre 2 — Le développement squelettique .....</b>	<b>14</b>
2.1 Modelage et remodelage du tissu osseux .....	15
2.2 Cartilage .....	17
2.3 Élasticité et plasticité du tissu osseux .....	19
<b>Chapitre 3 — Matériel et méthodes .....</b>	<b>23</b>
3.1 Collecte du matériel ostéologique .....	23
3.1.1 Populations à l'étude .....	23
3.2 Échantillonnage .....	24
3.2.1 Collecte de pattes .....	24
3.2.2 Collecte de données métriques .....	25
3.3 Variabilités intra et inter-groupes .....	26
3.3.1 Alimentation .....	26
3.3.2 Substrat .....	26
3.3.3 Âge, masse, et sexe .....	27
3.4 Pathologies, lésions, malformations .....	28
3.5.2 Condition d'élevage des populations échantillonnées .....	28
3.5.3 Collecte et préparation des spécimens .....	30
3.6 Collecte de données ostéométriques linéaires et 3D .....	31
3.6.1 Mesures linéaires et ratios .....	31
3.6.2 Mesures tridimensionnelles .....	34
3.7 Analyses statistiques .....	36
3.7.1 Variation intraobservateur .....	36

3.7.2 Conditions d'applicabilité des analyses.....	36
3.7.3 Analyses discriminantes linéaires.....	38
3.7.4 Test de TAU de correction de classification aléatoire .....	38
3.8.1 Comparaison avec les données écomorphologiques de Bishop (1994).....	39
<b>Chapitre 4 — Résultats .....</b>	<b>40</b>
4.1 Analyses discriminantes linéaires à deux groupes .....	40
4.1.1 Mesures linéaires porcs .....	40
4.3 Comparaison aux méthodes de Bishop .....	51
4.3.1 Méthodes par scores de Bishop .....	51
4.3.2 Analyses discriminantes linéaires basées sur les ratios identifiés par Bishop .....	55
<b>Chapitre 5 — Discussion et Conclusion .....</b>	<b>61</b>
5.1 Taux de mobilité et morphologie.....	61
L'ensemble des analyses discriminantes linéaires fournit des résultats de classification corrigés (TAU) supérieurs aux taux de classification aléatoires, à l'exception de l'analyse à deux groupes effectuée sur les ratios identifiés par Bishop (1994) (v. section 4.3.2.2).....	61
5.2 Mobilité et couverture végétale.....	62
5.2.1 Méthode par scores.....	62
5.2.2 Analyses discriminantes linéaires.....	64
5.3 Application en écomorphologie .....	64
5.4 Données 3D .....	66
<b>Bibliographie .....</b>	<b>i</b>
<b>Annexe 1. Résultats du test de T par échantillons en paires. ....</b>	<b>1</b>
<b>Annexe 2. Test de normalité des mesure linéaires.....</b>	<b>2</b>
<b>Annexe 3. Test de normalité des ratios.....</b>	<b>3</b>
<b>Annexe 4. Test de normalité des ratios identifiés par Bishop. ....</b>	<b>5</b>
<b>Annexe 5. Tableau d'inventaire. ....</b>	<b>6</b>
<b>Annexe 6. Tableau de mesures linéaires prises au pied à coulisse sur les astragales de sangliers élevés au Québec en 2015. Mesures en mm. ....</b>	<b>10</b>
<b>Annexe 7. Tableau de mesures linéaires prises au pied à coulisse sur les astragales de porcs dits conventionnels élevés au Québec en 2015. Mesures en mm.....</b>	<b>11</b>
<b>Annexe 8. Tableau de mesures linéaires prises au pied à coulisse sur les astragales de porcs biologiques élevés en extérieur au Québec en 2016. Mesures en mm. ....</b>	<b>12</b>
<b>Annexe 9. Tableau des ratios pour les astragales de sangliers élevés au Québec en 2015.</b>	<b>13</b>
<b>Annexe 10. Tableau des ratios pour les astragales de porcs dits conventionnels élevés au Québec en 2015.....</b>	<b>14</b>
<b>Annexe 11. Tableau des ratios pour les astragales de porcs biologiques élevés au Québec en 2015. ....</b>	<b>15</b>
<b>Annexe 12. Script R d'identification des variables corrélées.....</b>	<b>16</b>

# Liste des tableaux

I. Liste des mesures linéaires prises au pied à coulisse (1 à 27) et de la mesure tridimensionnelles 28 avec leurs descriptions respectives .....	32
II. Liste et définition des ratios proposés par Bishop (1994) et utilisés dans la présente recherche .....	33
III. Test du M de Box sur les mesures linéaires pour les porcs.....	40
IV Mesures linéaires retenues dans l'analyse discriminante linéaire sur les porcs .....	41
V Résultats de la classification effectuée par l'analyse discriminante linéaire sur les mesures linéaires pour les porcs .....	42
VI. Test du M de Box sur les ratios pour les porcs .....	43
VII. Ratios retenus dans l'analyse discriminante linéaire pour les porcs .....	43
VIII. Résultats de la classification effectuée par l'analyse discriminante linéaire sur les ratios pour les porcs .....	44
IX. Test du M de Box sur les mesures linéaires pour les trois groupes .....	45
X. Mesures linéaires retenues pour les trois groupes dans l'analyse discriminante linéaire .....	45
XI. Résultats de la classification effectuée par l'analyse discriminante linéaire sur les mesures linéaires pour les trois groupes .....	46
XII. Test du M de Box sur les ratios pour les trois groupes.....	48
XIII. Ratios retenus pour les trois groupes dans l'analyse discriminante linéaire.....	49
XIV. Résultats de la classification effectuée par l'analyse discriminante linéaire sur les ratios pour les trois groupes .....	50
XV. Test du M de Box sur les ratios identifiés par Bishop pour les porcs.....	55
XVI. Ratios identifiés par Bishop retenus dans l'analyse discriminante linéaire pour les porcs ..	56
XVII. Résultats de la classification effectuée par l'analyse discriminante linéaire sur les ratios identifiés par Bishop pour les porcs.....	57
XVIII. Test du M de Box sur les ratios identifiés par Bishop pour les trois groupes .....	58

XIX. Ratios identifiés par Bishop retenus dans l'analyse discriminante linéaire appliquée aux trois groupes.....	58
XX. Résultats de la classification effectuée par l'analyse discriminante linéaire appliquée aux trois groupes sur les ratios identifiés par Bishop .....	59
XXI. Résultats validés croisés et corrigés (TAU).....	61



# Liste des figures

Figure 1. Coupe du pied collectée.....	30
Figure 2. Mesures linéaires. Astragale droit illustré. A-C = vue antérieur; B = vue distale; D = vue postérieur; E = vue latérale. ....	34
Figure 3. Surface articulaire postérieur isolée. ....	35
Figure 4. Cylindre à gauche, sphère à droite. ....	35
Figure 5. Nuages de points de l'analyse discriminante linéaire sur mesures linéaires à trois groupes.....	47
Figure 6. Nuages de points de l'analyse discriminante linéaire sur ratios à trois groupes .....	51
Figure 7. Histogrammes PCFRAT .....	53
Figure 8. Histogrammes PCFRAT2 .....	53
Figure 9. Histogrammes PCFRAT3 .....	54
Figure 10. Histogrammes TTRAT .....	54
Figure 11. Histogrammes TIRTRAT.....	54
Figure 12. Histogrammes MLRAT .....	54
Figure 13. Histogrammes TATIMLR.....	54
Figure 14. Histogrammes de la différence absolue entre TITA1 et TITA2 .....	54
Figure 15. Nuages de points de l'analyse discriminante linéaire sur les ratios identifiés par Bishop, pour les trois populations à l'étude.....	60

## Liste des abréviations

fig. : figure

kg : kilogramme

mm : millimètre

m<sup>2</sup> : mètre carré

Ma : millions d'années (avant le présent)

P. : Porc

*S.* : *Sus*

*s.* : *scrofa*

*spp.* : *Species pluralis* (espèces multiples)

tab. : tableau

v. : voir

## Remerciements

Je tiens à remercier mes directrices, Professeure Ariane Burke et Professeure Michelle Drapeau pour leur soutien et leur intérêt dans cette recherche, en plus de leurs conseils et recommandations. Cette aide me suivra sans équivoque tout au long de mon cheminement. Je remercie également les membres du jury ayant évalué ce mémoire, soit Professeure Isabelle Ribot, présidente-rapporteuse, et Professeur Christian Gates St-Pierre, membre du jury.

Je dois une mention spéciale à Professeure Laura C. Bishop pour ses travaux et d'avoir accepté de répondre à mes questions par rapport à sa méthodologie.

Je remercie les producteurs et de sangliers et de porcs qui ont accepté de répondre à mes questions et de participer à ce projet. Votre passion et votre motivation sont des qualités admirables et nos conversations furent fort stimulantes, sans parler de la qualité de vos produits.

Je n'oublie pas tous ceux qui ont démontré de l'intérêt pour cette recherche, même lors des périodes où j'ai pu sembler excédé par la préparation de près d'une centaine de pattes de divers suidés. En particulier mes parents qui ont eu l'amabilité de me laisser parfumer leur garage au fumet de porc et sanglier pendant plusieurs semaines.



# Introduction

L'écomorphologie consiste à explorer les liens de causalité entre les facteurs environnementaux et les réponses adaptatives d'un organisme au niveau de sa morphologie (Bock and von Wahlert 1965, Bock 1989, 1994, Wainwright and Reilly 1994). Issue des sciences biologiques, l'écomorphologie a une diversité d'applications en paléontologie et en archéologie. Les travaux sur la domestication (Dayan 1994, Dayan and Simberloff 1995, Bar-Oz et al. 2003, Haber, Dayan, and Getz 2005, Redding 2005, Zeder 2005, Evin et al. 2013), les reconstitutions paléoenvironnementales (Kappelman 1988, Bishop 1994, Plummer and Bishop 1994, DeGusta and Vrba 2003, 2005a, b, Plummer, Bishop, and Hertel 2008, Faith et al. 2012, Meloro et al. 2013, Reed, Spencer, and Rector 2013), et l'étude des dynamiques proies-prédateurs (Emerson, Greene, and Charnov 1994, Palmqvist et al. 2008, Prevosti and Martin 2013) n'en sont que quelques exemples. De plus, le caractère non destructeur et peu coûteux des techniques employées fait que les analyses écomorphologiques s'insèrent bien dans la réalité du monde archéologique aux ressources toujours limitées.

Bien que l'ensemble du squelette se prête à l'exercice écomorphologique, certains éléments offrent des signaux plus clairs. Le crâne comprenant l'appareil masticateur constitue la source la plus fiable d'informations se rapportant à l'alimentation. De même, l'appareil locomoteur — en particulier les éléments podiaux — informe sur les habitudes motrices et l'environnement dans lequel les déplacements prennent place.

Dans le cadre de ce mémoire, nous ferons l'étude écomorphologique de l'astragale de trois populations de suidés élevées au Québec afin de déterminer si cet élément constitue un indicateur fiable du taux de mobilité individuel. Pour ce faire, 74 individus provenant de trois groupes élevés dans des conditions différentes seront comparés à l'aide d'une analyse discriminante linéaire, en plus d'une exploration de la morphologie tridimensionnelle par numérisation au laser. L'industrie de l'élevage porcin au Québec, avec ses divers modes d'élevage, offre l'opportunité de comparer des groupes d'animaux élevés sous des conditions contrôlées et dont le degré de mobilité diffère. Dans les élevages dits conventionnels, les pourceaux ont une mobilité restreinte alors que dans les élevages biologiques l'accès à des

enclos extérieurs favorise une mobilité plus grande. Nous proposons dans cette recherche que ces différences sont suffisamment importantes pour influencer de manière significative la morphologie de l'astragale et qu'il soit possible de distinguer les morphologies selon le taux de mobilité. Des populations de porcs (*Sus scrofa*) issues d'élevages conventionnels et biologiques seront donc comparées afin de déterminer quels aspects de la morphologie de l'astragale peuvent nous renseigner sur le taux de mobilité des suidés.

Bishop (1994) a proposé que la morphologie du pied des suidés reflète le caractère plus ouvert ou plus fermé de leur environnement. Nous proposons ici qu'il doive y avoir un lien entre le taux de mobilité et le degré d'ouverture de l'habitat (lié au type de végétation). Afin de tester cette hypothèse, nous examinerons également l'expression des variables morphologiques signalées par Bishop dans les populations de suidés étudiés ici.

Le Chapitre 1 consiste en une revue méthodologique et conceptuelle de l'approche écomorphologique. Ensuite, les facteurs dictant le taux de mobilité des individus seront explorés autant du point de vue des populations sauvages que des suidés domestiques. Enfin, les hypothèses testées dans ce mémoire seront exposées en détail.

Les différents aspects de la croissance et du développement squelettique, soit la croissance, le modelage, le remodelage, et l'élasticité et plasticité seront abordés au Chapitre 2.

Le Chapitre 3 se penchera sur le matériel et la méthodologie développée dans le cadre de cette recherche. Dans un premier temps, nous décrirons la préparation de l'échantillon et la collecte de données. Par la suite, je décrirai les différentes méthodes statistiques et leurs conditions d'application. Le Chapitre 4 présente la compilation des résultats des différentes analyses effectuées.

Le Chapitre 5 portera sur l'interprétation des résultats des analyses. Les résultats des analyses discriminantes linéaires seront exposés, suivis par une comparaison entre nos résultats et l'analyse de Bishop (1994). Enfin, ces résultats nous permettront de tester nos hypothèses et d'identifier les réponses morphologiques de l'astragale liées à la mobilité. Dans le Chapitre 6 (conclusion) nous décrirons les applications potentielles de cette recherche.

# Chapitre 1 — Cadre de la recherche

## 1.1 Écomorphologie

L'écomorphologie représente une approche relativement récente dans l'étude de la morphologie des vertébrés . Entre la publication *De l'origine des espèces* de Darwin en 1859 et les années 1950, les morphologues — outre les anatomistes en recherche médicale — se sont majoritairement concentrés sur l'anatomie comparée, sans rechercher les facteurs externes influençant le développement des morphologies qu'ils observaient. C'est au cours des années 1950 que les concepts de morphologie fonctionnelle et de morphologie évolutive se développèrent et apportèrent une approche pouvant être qualifiée d'écomorphologique (Bock 1989). Ces balbutiements de la recherche écomorphologique se concentraient principalement sur l'étude de l'appareil locomoteur et sur les structures crâniennes associées à l'alimentation, soit les deux fonctions liant un organisme à son écologie (Bock 1994).

Deux approches principales se distinguent en écomorphologie. Ces approches découlent respectivement des sciences morphologique et écologique. D'une part, l'approche morphologique porte son attention sur l'observation et la comparaison des adaptations d'une ou plusieurs populations plus ou moins rapprochées (Bock 1994). Cette approche tend à démontrer la variabilité des formes adoptées pour une même fonction et cherche à associer celles-ci pour des structures complexes, tel que l'appareil locomoteur dans son entièreté. Ensuite, l'approche dite écologique se concentre sur les schèmes adaptatifs, et les facteurs physiques et écologiques qui influencent le développement d'une morphologie observée (Bock 1994) et la réponse adaptative uniquement de l'os cortical (Banks-Sills et al. 2011, Ozcivici and Judex 2014, Rabey et al. 2015).

### 1.1.1 Concepts généraux

Plusieurs concepts utilisés en écomorphologie sont directement issus des deux sciences mères de la discipline que sont la biologie et l'écologie (Bock and von Wahlert 1965). La nomenclature de ces concepts manque toutefois de standardisation à travers la littérature. Il importe de bien distinguer les différents paliers d'interprétation afin de bien situer à quels niveaux les facteurs écomorphologiques opèrent. Les termes anglophones seront ici exposés avec une traduction proposée et une définition.

#### 1.1.1.1 Concepts liés à l'écologie

L'environnement englobe l'ensemble des facteurs physiques et biotiques avec lesquels l'organisme interagit de manière directe ou indirecte. Les interactions directes de l'organisme avec l'environnement définissent sa niche écologique.

Lorsqu'il est question de niche, deux concepts sont distinguables. Dans un premier temps, la niche potentielle englobe chaque trait de l'environnement que l'organisme possède la capacité d'exploiter, même de manière occasionnelle. Ensuite, la niche réalisée réfère aux facteurs environnementaux réellement exploités par l'organisme, voire de manière individuelle. Par exemple, bien que la niche réalisée d'une majorité de suidés soit les zones boisées (Virgós 2002), ceux-ci possèdent la capacité d'exploiter une plaine ou une zone humide en cas de besoin et ces zones sont donc comprises dans sa niche potentielle. Toutefois, le fond d'un lac ou la cime des arbres n'en font pas partie, du moins jusqu'à la découverte d'une espèce de suidés ailés.

La niche réalisée n'est pas fixe dans l'espace et dans le temps. Par exemple, des changements dans l'environnement — tel que le passage des saisons, ou les plus grandes tendances de changements environnementaux — peuvent stimuler différents rôles biologiques chez l'organisme et modifier sa niche réalisée au sein de sa niche potentielle. Certains organismes chercheront à retrouver leur niche réalisée dans un lieu autre via des stratégies migratoires, alors que d'autres modifieront leur niche réalisée via une capacité adaptative. Dans le cas des suidés, une capacité d'adaptation marquée leur permet de jouir d'une niche



potentielle très diversifiée. Cette capacité d'adaptation peut donc être décrite comme étant l'étendue de la niche potentielle et le taux d'adaptation de la niche réalisé dans celle-ci. Les facteurs environnementaux constituent donc des pressions sélectives sur l'organisme.

La flexibilité de la niche réalisée peut se faire à deux échelles distinctes, mais non mutuellement exclusives. Il est ici question d'évolution et d'adaptation développementale. Les deux phénomènes suivent les mêmes règles, mais vu la disparité d'échelle, utilisent des stratégies différentes. Au niveau évolutif, l'organisme jouissant de la meilleure valeur adaptative aura le potentiel de transmettre ce caractère afin de favoriser la synergie entre sa descendance et son environnement. Du point de vue de l'adaptation de l'organisme à son milieu de vie, c'est sa flexibilité du point de vue développemental qui est mise de l'avant. Deux aspects importants du rôle écologique, qui influent sur la morphologie de l'organisme, sont l'alimentation et la mobilité. Par le contrôle de la niche réalisée des suidés utilisés dans cette recherche, il est désiré d'isoler le taux de mobilité afin d'en mesurer l'impact adaptatif sur l'astragale. L'adaptativité de l'organisme au point de vue évolutif informe sur le point de vue environnemental, alors que l'adaptation développementale révèle des indices concernant l'exploitation même de la niche réalisée.

#### 1.1.1.2 Concepts liés au sujet observé

*Feature*, soit une structure, un élément, un trait ou un caractère réfèrent à toute portion d'un organisme — l'organisme en entier peut lui-même être utilisé — qui est observé. Chaque structure peut inclure ou constituer d'autres structures. Une hiérarchisation est possible entre ces termes, en débutant par l'organisme qui comprend un ensemble de structures, elle-même composé de divers éléments, et chaque élément pouvant être décrit en termes de traits et caractères. Les études morphologiques, selon les questions sur lesquelles elles se penchent, peuvent s'attarder à l'ensemble d'une structure, ou se limiter à un unique trait. Dans le cas de cette recherche, l'astragale correspond à l'élément observé et fait partie de la structure de la patte arrière, ou plus globalement de l'appareil locomoteur ; les diverses articulations constituant l'astragale peuvent être considérées comme les traits de l'élément.

*Form*, soit la forme, l'espace tridimensionnel occupé par l'élément est défini par la composition matérielle et l'arrangement de ces matériaux. Il importe de rappeler que, dû à la plasticité, la forme d'un élément n'est pas fixée dans le temps, même pour l'os, et c'est sur cette prémisse que repose l'entièreté de la présente recherche.

*Function* réfère à la fonction de l'élément dictée par les propriétés physiques et chimiques de la forme. Les fonctions peuvent et sont habituellement multiples pour un même élément. Par exemple, les fonctions principales de l'os sont celles de support et de réserve de sels et minéraux.

*Faculty* se rapporte à la capacité — terme ici choisi parce qu'il retire la connotation « mentale » que l'on retrouve dans le terme « faculté » — du complexe forme-fonction d'effectuer des actions. Dans le cas de l'appareil locomoteur, marcher, courir, ou sauter sont les principales capacités de la structure et se transfèrent à l'ensemble des éléments, dont l'astragale.

*Biological role*, simplement traduit en rôle biologique, est l'exploitation de la capacité par l'organisme. C'est donc à partir de ce niveau que les pressions de l'écologie entrent en jeu, puisque la capacité de marcher sera exploitée par le rôle biologique de la quête de nourriture, ou la recherche d'un lieu de repos, etc. De même, la course peut être exploitée dans le cadre du jeu, la fuite d'un prédateur, ou encore la chasse, par exemple. Vu l'importance de l'environnement dans la définition du rôle biologique, celui-ci ne peut être déterminé que par le biais d'observations de l'organisme dans sa niche réalisée.

## 1.2 Facteurs influant sur la mobilité

Quatre facteurs principaux sont identifiables. Dans un premier temps, l'espace physique à la disposition des individus représente le principal facteur favorisant la mobilité, ainsi que le principal facteur physique discriminant entre les populations utilisées pour cette recherche. En effet, les suidés exhibent un comportement d'exploration naturel. Cette exploration engage donc le rôle biologique de déplacement des individus et, naturellement, plus il y a d'espace à explorer, plus l'individu sera mobile. Il est donc possible de hiérarchiser

les populations de cette étude selon l'espace à leur disposition, soit le porc conventionnel avec peu d'espace, suivi du porc biologique ayant accès à des enclos extérieurs et bénéficiant d'enclos vastes, puis le sanglier étant exclusivement en élevage extérieur (v. section 3.5.2).

Dans un second temps, ce qui pourrait être qualifié « d'attrait » de l'environnement doit être pris en compte. Bien que le comportement d'exploration soit influencé par l'espace alloué à l'individu, celui-ci doit tout de même être stimulé dans son exploration (Boumans et al. 2015). Des études en agronomie se sont par ailleurs penchées sur la question en contrôlant la quantité de paille mise à la disposition des porcs dans un environnement contrôlé (Jensen 2006, Pedersen et al. 2014, Jensen et al. 2015), en introduisant des structures interactives (Averós et al. 2010, Zwicker et al. 2012), ou encore des sections de bois frais (Telkänranta, Bracke, and Valros 2014). Ces études supportent l'hypothèse qu'un environnement plus riche en stimuli potentiels favorise le comportement d'exploration de l'animal en plus de réduire les niveaux de stress et d'agressivité interindividuelle. Les parallèles à tirer avec les populations à l'étude sont les suivants : le porc conventionnel étant élevé sur un sol de lattes bétonnées sans litière, son comportement exploratoire est peu ou pas stimulé ; le porc biologique a à sa disposition une litière abondante dans les enclos et un espace ouvert extérieur qualifiable de neutre, soit un champ offrant naturellement des éléments à explorer, mais sans plus. Enfin, le sanglier peut laisser cours à ses explorations dans son environnement forestier offrant la plus grande variété et quantité de stimuli des trois groupes (Bolhuis et al. 2006).

D'autres sources de motivation à adopter un comportement plus mobile. La recherche de ressources alimentaires et les comportements de fuite ou d'évitement liés à la pression prédatrice (Emerson, Greene, and Charnov 1994, Palmqvist et al. 2008) en sont des exemples. Ces facteurs sont contrôlés pour les groupes ici étudiés via leur domestication et les modes d'élevage (Gustafsson, Jensen, de Jonge, and Schuurman 1999), mais ils constituent une réalité dans un environnement « naturel ». En effet, la niche spécifique influe sur le taux de mobilité à l'échelle de l'espèce. Certaines espèces sont migratrices, d'autres sont relativement peu mobiles. Dans le cas de *Sus scrofa spp.*, la niche potentielle relativement vaste et la niche réalisée flexible octroie une capacité adaptative remarquable. Tel que mentionné en 1.1.1.1, les

zones boisées sont favorisées vu leur richesse, mais les zones plus ouvertes font toujours partie de la niche potentielle du taxon (Virgós 2002). De même, les mouvements de population se font majoritairement dans un même environnement au gré de la disponibilité des ressources, sans atteindre un niveau « migratoire ».

Certaines recherches mettent aussi de l'avant des effets attribués à la domestication sur les comportements des individus où les groupes domestiqués adoptent des stratégies alimentaires plus statiques comparativement à leurs pairs « sauvages » ou croisés (Gustafsson, Jensen, de Jonge, Illmann, et al. 1999, Gustafsson, Jensen, de Jonge, and Schuurman 1999).

La densité de population influence aussi la mobilité des individus. D'une part, une densité élevée d'individus réduit l'espace disponible aux mouvements et activité d'exploration, mais aussi une densité élevée favorise le développement de comportements agressifs liés au taux de stress de l'animal et les individus tendent à réduire leur taux de mobilité afin d'éviter les interactions (Price 1999, Bolhuis et al. 2006, Petherick 2007, Boissy and Erhard 2014, Grandin and Deesing 2014).

Les synergies des individus avec leur environnement — substrat, nourriture, congénères, etc. — représentent une variable difficile à isoler. Enfin, les niveaux de stress vécus par l'animal ont un impact sur le métabolisme de celui-ci, et donc une répercussion potentielle sur son développement et état de santé. Ces variables gagneraient à être testées séparément afin d'établir les facteurs environnementaux qu'elles représentent.

L'ensemble de ces synergies nous amène logiquement à aborder les mécanismes de développement et d'adaptation des structures de l'organisme qui seront vus au Chapitre 2.

### 1.3 Application de l'écomorphologie en archéozoologie

Les observations sur des populations vivantes permettent d'établir sur des bases empiriques le lien entre le contexte écologique ou le comportement et morphologie. Ces liens peuvent par la suite être transposés aux espèces fossiles afin de contribuer à la reconstitution de leur contexte paléoécologique.

L'étude de populations issues d'une même espèce permet de souligner la variabilité morphologique et écologique d'un même taxon. De fait, cette recherche souligne l'importance d'affiner les analyses archéozoologiques au-delà de la simple détermination de l'espèce si l'on cherche à inférer sur l'environnement. Elle tente donc de dégager un exemple méthodologique s'adaptant à un vaste éventail de situations.

Les théories de la plasticité et du modelage du tissu osseux et du cartilage permettent d'affiner l'hypothèse voulant que des morphologies distinctes soient observables entre les groupes selon leur niveau de mobilité ; la diversité de la mobilité, soit par un substrat diversifié ou des reliefs topographiques, favoriserait la réponse des chondrocytes et ostéocytes par une stimulation dynamique. Ceci permettrait donc de formuler l'hypothèse voulant que, même à un niveau de mobilité théoriquement égal, deux populations puissent développer des morphologies distinctes dans le cas où l'une d'entre elles bénéficie d'un environnement plus diversifié.

Une caractéristique non négligeable de l'écomorphologie concerne la pluralité des méthodes de collecte des données qu'elle englobe. Celles-ci s'étendent de la prise de mesures linéaires au pied à coulisse, jusqu'à l'analyse tridimensionnelle par micro CT scan. Ceci permet une exploitation approfondie des éléments squelettiques, et ce avec des coûts relativement peu élevés. Ces diverses méthodes seront revues au Chapitre 3.

#### 1.4 Travaux de Laura C. Bishop

Dans sa thèse de 1994, Laura C. Bishop explore l'ensemble de l'appareil locomoteur chez les suidés sous une approche chronostratigraphique et écomorphologique dans le but d'établir un modèle de la diversité taxonomique et écologique à travers le temps pour les sites d'Afrique orientale.

Pour ce faire, elle fit usage de ratios morphométriques développés à partir de mesures linéaires prises au pied à coulisse. Ces mesures linéaires et ratios constituent la base de la méthodologie élaborée pour la présente recherche. Les mesures de Bishop sont en effet plus exhaustives dans leurs caractérisations des formes de l'os, particulièrement pour l'astragale, en

contraste avec des travaux du même ordre appliqués aux bovidés et cervidés (Kappelman 1988, DeGusta and Vrba 2003, 2005a, Curran 2012). Les ratios caractérisant des suidés modernes furent utilisés dans des analyses discriminantes qui furent par la suite appliquées aux taxons archéologiques. Ces ratios furent également utilisés sous la forme de scores avec pour objectif de proposer un système de classification des espèces de suidés selon les niveaux de couverture végétale présents dans l'environnement. Cette méthode par score varie d'interprétation selon le ratio observé. Cette méthode et ses résultats sur l'échantillon utilisé dans cette recherche sont situés à la section 5.2.1.

Les conclusions de Bishop soutiennent que les suidés et hominines partagent un apex de diversité taxonomique entre 2 et 1.7 Ma. De plus, les fossiles de suidés étudiés démontrent également une diversité dans l'ouverture des habitats pour ceux-ci sur les sites d'Afrique orientale.

L'un des objectifs de la présente recherche est d'affiner la compréhension des différents facteurs environnementaux qui dictent la forme des structures biologiques. Bishop définit bien l'impact du type d'habitat, mais cette conclusion ne permet pas d'inférer sur l'exploitation dudit milieu par l'organisme. Cette présente recherche explore donc l'hypothèse selon laquelle l'astragale, chez les suidés, permet de distinguer des populations selon leurs taux de mobilité. Il sera également vérifié si les signaux d'ouverture de l'habitat observés par Bishop et les signaux attribuables au taux de mobilité partagent une expression commune (v. section 4.3).

## 1.5 Choix de l'astragale

Bien que plusieurs os s'avèrent utiles pour les études écomorphologiques, des facteurs pratiques et théoriques justifient le choix de l'astragale pour cette recherche. D'un point de vue biomécanique, la position centrale de l'astragale dans le complexe articulaire de la cheville indique que cet élément risque d'être directement influencé par le type de mobilité ou de substrat. Que ce soit dans le support axial de la masse corporelle et des charges mécaniques liées au contact avec le substrat, en passant par le rôle articulaire crucial avec les os du tarse, le

tibia, et le calcaneus, l'astragale subit des charges statiques et dynamiques extrêmement variées.

Le rôle central de l'astragale dans le complexe articulaire nécessite également une intégrité biomécanique de l'os dès le plus jeune âge de l'animal. De fait, l'astragale se développe à partir d'un unique centre d'ossification et adopte sa morphologie fonctionnelle au niveau du tissu osseux très rapidement et ne possède pas d'épiphyes nécessitant une fusion subséquente (Popkin et al. 2012, Zeder, Lemoine, and Payne 2015).

De plus, archéologiquement parlant, l'astragale, comme pour les autres os du tarse, se conserve généralement très bien. C'est un os compact, qui présente une surface réduite et un allongement quasi nul, ce qui le rend peu vulnérable aux fractures. L'absence de cavité médullaire fait qu'il ne contient pas de moelle riche en gras, ce qui le rend peu attrayant au niveau alimentaire, autant pour les carnivores que les hominines. De plus, l'absence d'os cortical significativement épais et résistant ne favorise pas sa transformation en outils.

Du point de vue diagnostique, l'astragale est un élément utile pour l'identification taxinomique au niveau du genre (DeGusta and Vrba 2003). En effet, la morphologie de l'astragale des suidés les distingue facilement des autres artiodactyles tels les *Bovidae* et les *Cervidae*.

Enfin, la réalité de la production porcine moderne favorise l'astragale vu sa location relativement distale dans la patte de l'animal. En effet, la coupe « normale » du pied se fait au-dessus de l'articulation de la cheville, donc du tibia avec l'astragale. Cette coupe traverse le calcaneus (os qui était également considéré pour cette recherche au stade de l'élaboration du projet) mais épargne l'astragale.

Au final, l'ensemble de ces caractéristiques favorisent l'utilisation de l'astragale en écomorphologie (Bishop 1994, Martinez and Sudre 1995, DeGusta and Vrba 2003, 2005a, b, Kovarovic and Andrews 2007, Weinand 2007, Kaptoge et al. 2008, Plummer, Bishop, and Hertel 2008, Curran 2009, 2012, Tsubamoto 2012, Rozzi and Palombo 2013, Ginot et al. 2016).

## 1.6 Ouvertures de la recherche

La possibilité d'identifier le niveau de mobilités des suidés à partir du matériel squelettique offre plusieurs pistes de recherche intéressantes. Il serait possible d'interpréter les conditions d'élevage des suidés à partir des assemblages archéozoologiques, par exemple. Il serait possible d'inférer sur l'organisation spatiale et les infrastructures — des enclos plus ou moins grands — et de porter des réflexions sur les modes d'élevage. Il serait également possible d'identifier des signaux de domestication où un individu sauvage mis en enclos ou encore une seconde génération d'animaux apprivoisés ou en voie de domestication active seraient distincts de leurs homologues non domestiques. Cette prémisse serait aussi vraie pour des cas de marronnage où une augmentation du taux de mobilité chez le porc domestique peut être observée.

Les reconstructions paléoenvironnementales pour les sites produisant des fossiles d'hominines dépendent quasi entièrement de la faune associée dans les assemblages archéozoologiques. Cela s'explique d'une part par la valeur inestimable et la rareté des spécimens d'hominines (Su and Harrison 2008, Su and Harrison 2014) ; très peu de chercheurs ont accès au matériel, et il n'est pas possible d'effectuer des analyses invasives sur celui-ci. D'autre part, l'évolution de l'appareil locomoteur des hominines étant particulièrement centrale et unique, très peu d'informations écomorphologiques peuvent être extraites de ces rares spécimens ; les signaux potentiellement liés à la couverture végétale de l'environnement ou au niveau de mobilité se retrouvent éclipsés par le développement de la bipédie. De même, cette évolution touche la quasi-totalité du squelette hominine. Les interactions mêmes des structures liées à la bipédie — du complexe podial à la morphologie de la colonne vertébrale, en passant par le genou, la ceinture pelvienne, etc., sans compter les adaptations propres aux membres supérieurs — sont le sujet de l'anatomie comparée en termes d'anatomie fonctionnelle. Enfin, la rareté des fossiles d'hominines contemporains au sens large et leur fragmentation ne se prêtent pas à la construction d'un corpus comparatif significatif ; la bipédie moderne est considérée trop éloignée de la bipédie des premiers hominines (Richmond, Begun, and Strait 2001, Crompton, Vereecke, and Thorpe 2008, Crompton,



Sellers, and Thorpe 2010) pour établir des analyses écomorphologiques par mandataire avec *Homo sapiens* fiables.

L'historique évolutif parallèle entre la lignée humaine et celle des suidés fait de ces derniers un mandataire non négligeable pour l'étude des hominines. Leur présence en association à des sites hominines en Afrique (Bishop 1994, Plummer and Bishop 1994, Bishop et al. 2006, Faith et al. 2012) à elle seule constitue une première raison de les étudier sous l'optique de l'écomorphologie. Par contre, la concomitance des niches écologiques (Bishop 1994, Virgós 2002, Su and Harrison 2008) et prédatrices des hominines et suidés (Emerson, Greene, and Charnov 1994) constitue le lien le plus significatif digne d'intérêt à mes yeux. En effet, puisqu'il est possible d'inférer sur le niveau de mobilité des suidés et qu'ils sont portés à occuper un type d'habitat relativement stable entre les sous-espèces (Virgós 2002), le facteur le plus probable dans la stimulation de la mobilité serait les stratégies d'évitement des prédateurs par la fuite. Sous cette prémisse, l'identification de suidés à mobilité élevée pourrait soutenir la présence d'une pression prédatrice notable dans l'environnement (Bobe, Behrensmeyer, and Chapman 2002, Klein et al. 2007, Su and Harrison 2008, Werdelin 2008, Werdelin and Manthi 2012, Behrensmeyer and Reed 2013, Reed, Spencer, and Rector 2013, Drapeau et al. 2014, Su and Harrison 2014). L'association de fossiles d'hominines à une présence ou absence desdits prédateurs via le mandataire de la mobilité observée dans l'assemblage faunique associée permettrait l'inclusion de la pression prédatrice dans les reconstructions pléoenvironnementales.

## Chapitre 2 —Le développement squelettique

Bien que la forme générale de chaque élément soit dictée par la génétique, le tissu en formation répond à des forces exogènes mécanico-chimiques — hormones, nutriments, activité physique, etc. — qui altèrent la physiologie des tissus au cours de la croissance. Or, dans l'état actuel des connaissances, deux possibilités sont envisagées: soit les charges appliquées à l'élément au cours de la croissance déterminent sa morphologie — dans une optique d'adaptation fonctionnelle — ou elles servent de facteurs permettant l'acquisition de la forme génétiquement contrôlée, à la manière d'une hormone de régulation (Bertram and Swartz 1991).

L'os cortical croît par apposition. Ce sont les ostéoblastes — cellules dérivées du périoste — qui déposent une matrice de collagène ostéoïde qui sera minéralisée. Au cours de la minéralisation de la matrice, les ostéoblastes sont inclus dans l'os pour devenir les ostéocytes. Il est à noter que la densité d'ostéocytes dans le tissu osseux est négativement corrélée avec la masse corporelle (Currey 2002, Hall 2005, Wojnar 2010, Currey 2011), ce qui un tissu plus dense pour les organismes de masse corporelle plus importante ; le tissu plus dense sera ultimement moins plastique (Madrell et al. 1998). L'os ainsi créé se distingue en deux types selon la vitesse de déposition, soit l'os réticulaire, déposé rapidement — de l'ordre de plus de 4  $\mu\text{m}$  par jour, typique des phases de croissance rapide — et l'os lamellaire déposé à moins de 1  $\mu\text{m}$  par jour (Currey 2002, Hall 2005, Wojnar 2010, Currey 2011). Il faut noter que l'os réticulaire entre dans la formation de l'os plexiforme — aussi appelé laminaire ou fibrolamellaire — que l'on retrouve chez les grands mammifères à croissance rapide ; sa structure en « briques » se construit par apposition rapide d'os réticulaire sur des réseaux de vascularisation qui créent des lacunes. Ces lacunes seront comblées par de l'os lamellaire, créant l'illusion de « briques » centrées sur les ostéons primaires (Currey 2002, Hall 2005, Wojnar 2010, Currey 2011).

Lorsqu'il y a déposition aux portions distales de la diaphyse, l'os lamellaire empiètera sur l'os trabéculaire présent et l'enveloppera, ce qui résultera dans la formation de l'os

compact (Currey 2002), structure qui sera remplacée par de l'os lamellaire via le remodelage haversien.

Le cartilage de croissance est le tissu permettant la croissance en longueur des os longs et la croissance générale des épiphyses. Afin de croître, les chondrocytes du cartilage déposent la matrice de collagène sous l'effet des hormones de croissance et des charges mécaniques (Platzer 2005). Wertz (2006) postule que la croissance est stimulée par l'augmentation des charges imposées aux centres d'ossification dus à l'augmentation de la force des muscles. Cette augmentation des charges stimule la réponse adaptative des chondrocytes du cartilage de conjugaison (Weinans et al. 2012) jusqu'à l'atteinte d'un seuil de saturation après quoi la synthèse de chondrocytes est atteinte et l'ossification débute (Wertz et al. 2006), entraînant la fin de la croissance, et donc du modelage de l'épiphyse et des portions articulaires de l'os.

Les individus échantillonnés dans cette recherche sont abattus dès l'atteinte de la maturité sexuelle. Le taux de croissance ralentit drastiquement à ce stade développemental dû aux changements hormonaux qui stimulent le développement musculaire. Ce développement de la force musculaire entraîne le dépassement du seuil de saturation des chondrocytes et donc l'ossification des cartilages de croissance (Wertz et al. 2006). L'utilisation d'individus de cet âge permet donc l'exclusion des impacts des facteurs ontogéniques sur l'os; les réponses adaptatives dans la forme de l'os sont également plus sensibles au cours du développement (Currey 2002, Hall 2005, Platzer 2005, Wojnar 2010, Currey 2011).

## 2.1 Modelage et remodelage du tissu osseux

Wolff (1892) fournit la base fondatrice de l'étude de la biologie osseuse avec son ouvrage « The Law of Bone Remodeling ». Le postulat de Wolff est que l'os s'adapte aux demandes mécaniques en modifiant sa morphologie, et donc ses propriétés mécaniques. Ses observations s'avèrent justes, mais les processus explicatifs proposés, eux, sont critiqués (Bertram and Swartz 1991).

Bien qu'il soit largement accepté que l'os réagisse aux charges et microdommages par modelage ou remodelage, l'objectif principal du tissu est de rétablir ses caractéristiques

mécaniques avec une masse minimale (Boyde 2003). Le maintien ou l'atteinte de cette intégrité mécanique ne nécessite pas forcément le modelage ou remodelage des zones directement affectées par les charges ou dommages entraînés par le nouvel environnement mécanique et l'os peut compenser plutôt que réparer, selon la situation.

Les observations de Frost (1994) mettent de l'avant un niveau de charge efficace minimale – *minimum effective strain*, MES — entre 1500 et 3000 microcharges (*microstrains*) ou plus pour déclencher le modelage, et entre 100 et 300 microcharges et moins pour l'augmentation du remodelage. La plage intermédiaire de microcharges ne stimulerait ni l'un ni l'autre des mécanismes de manière différentielle et correspond donc à un maintien de la masse osseuse. Toutefois, il ne faut pas assumer que lorsqu'une réponse de modelage est déclenchée, tout remodelage cesse, et vice-versa. Chacun des processus répond, certes, aux stimulus mécaniques, mais ils remplissent toujours un rôle systémique en parallèle. De plus, l'ensemble de l'os ne reçoit pas les mêmes taux ou niveaux de charge selon la région, et différentes régions auront donc des niveaux de stimulation distincts et de réponses différentes en conséquence.

Le modelage de l'os lors de la croissance implique un processus comparable au travail un sculpteur travaillant le plâtre ou l'argile (Frost 1990a). Le matériel de base est présent ou en formation, mais désorganisé et le modelage organise et structure le tissu en termes de taille, de forme, d'orientation, de composition, et de distribution du tissu osseux. Au cours de la croissance, le modelage entraîne des changements visibles significatifs (Frost 1987). Le facteur le plus important stimulant le modelage est l'historique de charge (Frost 1990a, b). Cet historique fait référence à la moyenne dans le temps des répétitions de charges typiques dans le tissu. De rares charges de grande magnitude n'auront qu'un impact peu significatif, voir absent sur le modelage, tant qu'elles ne compromettent pas l'intégrité structurelle du tissu. Le modelage et le remodelage de l'os sont affectés par les charges en compression, en torsion, en tension et en pliage (Madrell et al. 1998) et répondent à des paliers de charges propres à chacun des mécanismes comme il sera abordé dans la section suivante.

Le remodelage relève de l'action conjointe des ostéoclastes résorbant l'os et les ostéoblastes comblant la lacune ainsi créée (Currey 2002, Hall 2005) ; l'ensemble est baptisé BMU, soit *Basic Multicellular Unit*. Au cours du remodelage par l'action des BMU, l'os haversien déposé est plus jeune que celui qu'il remplace, et est donc moins minéralisé. De même, l'ostéon comprend le canal de Havers, soit un vide en son centre ; Frost (1987) suggère que pour 20 parties résorbées, 19 sont déposées lors du passage des BMU. La combinaison de ces facteurs fait que le remodelage entraîne une perte en masse osseuse globale.

Pour l'os trabéculaire, situé aux épiphyses, Wolff (1892) propose un mécanisme de « dérive adaptative » où les trabécules se remodeleraient selon l'état de l'environnement avec une croissance de nouvelles trabécules et du renforcement de trabécules existantes, avec la résorption de celles devenues obsolètes (Bertram and Swartz 1991). Toutefois, Swartz et Bertram (1991) avancent qu'il n'y a pas de cas documentés de remodelage au niveau de l'os trabéculaire en absence de dommages ou de pathologies dans la structure (Currey 2002). En cas de fracture ou de lésion au niveau de l'épiphyse, la région affectée sera sujette à une augmentation du flux sanguin et une forte altération de ses propriétés mécaniques (Judex et al. 1997) ; les lésions dans l'os trabéculaire sont d'autant plus significatives dans les changements de caractéristiques de l'os puisque la résorption des trabécules par les ostéoclastes s'amorce dès que les charges se dissipent et les trabécules restantes, surchargées, entrent en phase de remodelage (Frost 1987, Judex, Whiting, and Zernicke 1999).

## 2.2 Cartilage

L'articulation en croissance est altérée par les charges associées à l'activité physique et la charge statique musculaire (Frost 1990c) ; par exemple, l'obliquité fémorale est associée à la configuration de l'articulation du genou lors de l'apprentissage de la marche, observations concordantes avec celles de Frost (1990c) sur des individus paralysés de naissance chez qui l'obliquité ne se développe pas. Un exemple quelque peu extrême pour le genou concerne la maladie de Blount (Sabharwal et al. 2012). Cette affection développementale présente une inhibition de la croissance de la portion postéromédiale du tibia proximal, ce qui lui donne un

aspect affaissé et arque la jambe latéralement au niveau du genou. Le développement tardif du trouble est souvent associé à des cas d'obésité infantile, et donc de charges anormalement élevées au niveau des cartilages de conjugaison. On observe une compensation dans l'articulation par une hypertrophie du cartilage articulaire du plateau tibial médial et du ménisque articulaire médial, ce qui permet, en partie seulement, de sauvegarder une part des caractéristiques mécaniques du genou (Sabharwal et al. 2012). Ces cas illustrent donc deux phénomènes intéressants, soit certains mécanismes du modelage du cartilage, mais aussi la plasticité de l'articulation. En effet, bien que la forme adoptée par le tibia soit fonctionnelle, elle diverge de l'organisation « de base » ou « optimale » que l'organisme vise au cours de la croissance. Un phénomène semblable fut observé sur un certain nombre de porcs d'élevage dits conventionnels non retenus pour cette recherche. En effet, certaines pattes collectées présentaient une malformation de l'astragale ou l'un des condyles s'articulant avec le tibia était manquant. La portion osseuse manquante était comblée par un cartilage articulaire hypertrophié suivant la forme attendue de l'os. Ceci souligne donc une limite à l'étude de l'os puisqu'il est possible que les caractéristiques de l'ensemble articulaire ne soient pas limitées au matériel archéologiquement observable.

Le cartilage en lui-même ne se prête pas au remodelage ; son cycle unique de croissance se termine par une calcification. Le cartilage calcifié est dérivé du cartilage hyalin à l'interface de l'épiphyse et représente un « vestige » de l'ossification endochondrale (Weinans et al. 2012). Ses propriétés mécaniques sont intermédiaires entre celles de l'os et du cartilage hyalin articulaire, mais il est beaucoup plus fragile et sujet aux microcraques. De même, le remodelage y est quasi inexistant, mais sa croissance est rapide (Currey 2002, Hall 2005) et son modelage est entièrement dépendant de la croissance endochondrale de l'épiphyse, puisqu'il en est l'interface. Son rôle est toutefois crucial dans le transfert des charges à la plaque subchondrale et à son modelage puisqu'il est la porte d'entrée pour la vascularisation du cartilage à partir de l'os subchondral. Son ossification est d'ailleurs très semblable au processus d'ossification endochondrale observé au cours de la croissance à partir des centres d'ossification secondaires (Wong and Carter 2003). Le cartilage peut également se calcifier

sous l'action de stress importants inhabituels ou de pathologies articulaires (Weinans et al. 2012) Ce cartilage calcifié constitue une source supplémentaire de changements morphologiques dans les articulations. L'astragale étant pratiquement articulé sur toutes ses faces, l'ossification de son cartilage articulaire pourrait significativement influencer sur sa forme. Il n'est pas avancé dans cette recherche d'observer les caractéristiques d'un potentiel cartilage calcifié. Celui-ci pourrait avoir un impact plus important sur la morphologie osseuse d'individus plus âgés ou pathologiques.

### 2.3 Élasticité et plasticité du tissu osseux

L'élasticité des matériaux est mesurée en observant la déformation résultant de l'application d'une force mécanique (Currey 2002). Il demeure toutefois difficile de déterminer les propriétés mécaniques d'os entiers vu leur caractère anisotropique — les propriétés mécaniques du tissu changent en fonction de l'orientation de la force appliquée — et hétérogène en structure comme en composition (Currey 2002, Hall 2005, Wojnar 2010). De même, les propriétés élastiques des tissus dépendent fortement des conditions environnementales, soit la température, l'hydratation, la pression hydrostatique de l'os entier, etc., et ces conditions sont difficilement recréées en expérimentation *in vitro*. L'os trabéculaire est aussi difficilement testable puisque ses qualités mécaniques sont extrêmement dépendantes des structures attenantes pour favoriser son rôle de soutien, en plus de la variabilité zonale de ces caractéristiques qui complique sa mesure (Currey 2002). Ceci fait qu'une modélisation cherchant à projeter les adaptations de la forme d'une articulation serait trop complexe pour être pratique.

Une avenue probablement simplifiée, mais plus facilement applicable, dans la détermination des caractéristiques mécaniques de l'os trabéculaire restent de les définir par rapport à la densité de celui-ci (Currey 2002).

Canillas del Rey et al. (2012) définissent la plasticité comme suit:

« Plasticity defines the capacity of an entity [...] to be changed by mechanical force, remain modified or return to its original state. The concept of plasticity in biology is

complex because it represents a thinning of the line between phenotype and function, where the interpretation of both depends on sensory perception. »

La stimulation de cette capacité de réponse aux forces mécaniques suit trois règles (Turner 1998). (1) Les charges dynamiques sont préférables aux charges statiques ; le seuil de charges efficaces minimales est plus facilement outrepassé avec des charges dynamiques. Les charges statiques se maintiennent habituellement dans la zone neutre entre le modelage et le remodelage où il y a un maintien de la masse et de l'organisation du tissu ; comme vu plus tôt, au cours de la croissance les charges statiques augmentent et stimulent donc le modelage, mais à maturité elles demeurent plus stables. (2) Le taux de charge est important : les charges mécaniques trop courtes sont sans effet — une durée appropriée engendre une réponse adaptative —, mais si la charge persiste, le tissu adhère à la troisième règle, soit (3) la désensibilisation des cellules aux stimuli ; si le stimulus persiste dans le temps, la cellule réduit sa réponse et nécessite donc des périodes de repos afin de se resensibiliser, soit sous la forme d'arrêts de la stimulation ou de modifications de l'environnement.

Lorsque la question de la plasticité est abordée au niveau des articulations, la complexité même de la structure devient un problème. Cette complexité implique une collecte de données beaucoup plus exigeantes incluant quantité de paramètres supplémentaires — interaction des différents types de tissus, réaction aux charges dynamiques, influence de la morphologie et congruence de plusieurs éléments, etc. — en comparaison à la plasticité des diaphyses. Puis, de telles formes exigent une congruité de plusieurs éléments codépendants possédant tous des caractéristiques propres, que ce soit en termes de tissu comme de structure. De même, les différents tissus et structures composant les articulations ont des taux de modification ontogénique différentiels, ce qui nécessite une plasticité en termes de taille et de forme de l'ensemble afin de conserver une intégrité mécanique fonctionnelle, soit un état de symmorphose où la structure correspond à ses exigences mécaniques (Schmidt-Nielsen et al. 1998, Hamrick 1999). Le taux de mobilité influence directement l'environnement mécanique de l'astragale et le taux de mobilité constitue le principal stimulus.



La forme des os suit un modèle génétiquement déterminé. Les caractères morphologiques peuvent dépendre de plusieurs gènes, mais la forme finale adoptée subit aussi l'influence mécanique et chimique de son environnement (Canillas del Rey et al. 2012). Pour l'articulation, la plasticité du cartilage est d'autant plus pertinente puisque la croissance enchondrale postnatale et le modelage influencent directement la taille, la forme, l'orientation, et l'alignement de l'articulation adulte en réponse à la morphologie des épiphyses et apophyses, qui suivent les règles de la plasticité du cartilage (Frost 1990, 1994) ; par le fait même, les surfaces articulaires sont plus aptes à s'adapter au cours du développement lorsque le cartilage constitue encore une portion importante de l'ensemble. Après la maturation squelettique, ce sont les diaphyses qui s'adaptent le plus aux changements d'environnement mécanique (Hellier and Jeffery 2006). Par exemple, l'observation des complexes articulaires du genou chez des adultes en relation avec des changements de masse corporelle montre que la taille et la morphologie des articulations demeurent quasi inchangées, alors que le profil en coupe des diaphyses et du col fémoral est affecté (Ruff, Scott, and Liu 1991). Cela soutient qu'il n'est pas nécessaire d'échantillonner des individus où la croissance est accomplie puisque les articulations sont plus sensibles plastiquement au cours du développement.

L'idée directrice la plus acceptée en ce qui concerne la plasticité, soit articulaire ou diaphysaire, est que les déformations plastiques — lorsqu'elles ne franchissent pas le cap pathologique — tendent vers le modelage d'une morphologie diminuant les stress mécaniques moyens supportés par la structure, en d'autres mots, l'optimisation de la force (Currey 2002). La morphologie et la densité de l'os subchondral varient selon plusieurs facteurs. La variation s'observe d'une articulation à l'autre, selon les charges qui sont transmises à la plaque subchondrale, mais aussi selon la morphologie même de l'articulation qui crée des zones de charges variables sur l'os (Giunta et al. 1996, Eckstein, Jacobs, and Merz 1997). Les facteurs de charge et la morphologie du complexe articulaire sont donc codépendants dans le modelage et le remodelage de l'os subchondral.

Du point de vue de l'astragale, nous pouvons nous attendre à ce qu'un individu à haut taux de mobilité développe des formes différentes de celles d'un individu peu mobile

simplement parce que la nature et la fréquence des charges sont différentes. Les analyses qui seront présentées au chapitre suivant cherchent donc à mesurer à quel point ces différences sont significatives afin de déterminer si des taux de mobilité différents impactent significativement la forme de l'astragale afin de distinguer les populations.

## Chapitre 3 — Matériel et méthodes

### 3.1 Collecte du matériel ostéologique

Le but de cette recherche est de créer une collection de référence qui nous permet d'identifier et de quantifier l'impact du taux de mobilité sur la morphologie osseuse de suidés. Pour ce faire nous avons collecté des astragales de trois populations de suidés issus d'élevages québécois. Les conditions d'élevage des populations utilisées dans cette étude, ainsi que les étapes préparatoires à la collecte de données ostéométriques sont exposées ci-dessous.

#### 3.1.1 Populations à l'étude

La famille des *Suidae* fait partie de la classe des mammifères et de l'ordre des artiodactyles. Cette famille inclut la sous-famille des *Suinae* à laquelle appartient le genre *Sus*, où se retrouvent une dizaine d'espèces vivantes, dont *Sus scrofa*. L'espèce *Sus scrofa* européenne est parfois divisée en deux sous-espèces : *Sus scrofa scrofa* - le sanglier eurasiatique, à ne pas confondre avec le porc sauvage ou marronné - et *Sus s. domesticus* (parfois simplement classifiée sous *Sus domesticus*) qui englobe la totalité des variétés de porcs d'élevage occidentaux et européens (Taxonomicon 2004-2016).

Plusieurs variétés de *S. s. domesticus* furent développées pour différentes caractéristiques au niveau de la production de viande. On retrouve principalement trois de ces variétés au Québec, soit le porc Yorkshire — aussi connu comme le « gros blanc » — qui est le plus important, le Berkshire — ou le « porc anglais » avec une face tronquée —, et le Tamworth qui, selon les éleveurs, se rapproche plus du sanglier que les deux précédents. Dans le cadre de cette recherche, toutes les pattes de porc proviennent de porcs Yorkshire.

Pour *S. s. scrofa* (sanglier eurasiatique), la ligne est trouble quant au statut domestique de l'animal lorsqu'il se retrouve en élevage. En effet, l'élevage du sanglier se fait dans des conditions se rapprochant le plus possible d'une vie en liberté avec des enclos de très grande taille à l'extérieur, ainsi que des portions de forêt clôturées où les comportements naturels de recherche et d'alimentation sont possibles. Par ailleurs, des tentatives d'élevage « intensif » se

rapprochant du mode d'élevage utilisé pour le porc dit « conventionnel » furent infructueuses par le passé (communication personnelle avec éleveurs de sanglier, 2015-10-10).

Dans le cadre de ce projet, trois populations de *Sus scrofa* sont échantillonnées, soit le porc d'élevage dit « conventionnel », le porc d'élevage dit « biologique », et le sanglier. Les trois groupes sont constitués d'une combinaison de femelles et de mâles castrés dans des proportions inconnues. La réalité de la production et de la préparation des carcasses ne permet pas de distinguer entre les sexes dans notre échantillon. Pour le sanglier, les pattes furent collectées sans discrimination entre les sexes afin d'obtenir un échantillon comparable au porc domestique.

L'absence de distinction entre les sexes dans les populations à l'étude ne pose pas de problème au niveau de nos analyses puisque les animaux échantillonnés sont en bas âge et n'auront pas encore développé de dimorphisme sexuel au niveau du poids (facteur qui aurait pu influencer la croissance osseuse). De plus, les mâles castrés sont moins dimorphiques que les mâles entiers. L'utilisation de mâles castrés — bien qu'ils ne constituent théoriquement pas un mandataire idéal pour représenter une population mâle naturellement non castrée — est un reflet de la réalité des productions d'animaux à viande (Boden 2005) et n'empêche pas l'animal de croître et ne semble pas réduire sa capacité à s'adapter morphologiquement à son environnement (Popkin et al. 2012).

## 3.2 Échantillonnage

### 3.2.1 Collecte de pattes

Le comportement des différentes populations échantillonnées n'a pas été observé directement. Cette limitation est due, entre autres, aux réalités de l'industrie de la production porcine qui ne se prête pas à la réalisation d'observations de plusieurs jours, voir semaines dans le cadre de ce projet de recherche. De plus, la dépendance des animaux à l'humain pour l'approvisionnement en nourriture fait que la simple présence humaine modifie le comportement du porc. Il fut possible d'observer brièvement le comportement des sangliers à distance et via une passerelle surplombant certains espaces de vie — le sanglier étant limité

dans sa vision vers le haut ne voit pas la passerelle —, mais la même chose fut impossible pour les porcs ; dans le cas du porc conventionnel, bien que des équipements vidéo sont habituellement installés sur les lieux d'élevage, l'accès à ces informations s'est avéré impossible.

Les dimensions des enclos (v. section 3.1.2) furent toutefois notées lors de visites chez les producteurs pour le porc biologique et le sanglier. De même, le comportement des animaux fut relaté par les producteurs lors de ces mêmes visites.

La collecte d'éléments fut limitée à une seule latéralité par individu, la compilation des deux latéralités aurait constitué une source de données intéressantes. En effet, le développement d'une asymétrie peut être possible selon les comportements adoptés. Un exemple extrême est observable chez les lévriers de course où les os du tarse développent des morphologies différentes entre les latéralités en réponse aux charges différentielles lors de la course sur circuit (Johnson et al. 2000). Bien que les porcs et sangliers ne soient pas des athlètes sur circuits, la possibilité d'une asymétrie statistiquement observable reste entière, mais le souci de contrôle des variables dans cette étude justifie l'utilisation d'une seule latéralité. La variation interindividuelle est attestée dans ce travail, mais la variation intra-individuelle pourrait constituer une source de données pertinente dans l'affinement des modèles de mobilité et paléoenvironnementaux.

### 3.2.2 Collecte de données métriques

Morphologiquement, les formes très courbes et quelque peu « indéfinies » de l'astragale compliquent la prise de certaines mesures nécessitant une orientation rigoureusement standardisée de l'os. Enfin, le caractère indéfini de certaines surfaces articulaires rend la prise de mesures sujette à un certain niveau de subjectivité. Néanmoins, les descriptions illustrées à la figure 2, ainsi que le tableau I, permettent à notre avis une bonne reproductibilité des mesures linéaires ; le test de T par paires d'échantillons (v. tab. III, p. 33) indique une constance dans la prise des mesures au niveau intraobservateur. Il s'avérerait intéressant d'effectuer un test similaire pour la variabilité interobservatrice dans le futur.

### 3.3 Variabilités intra et inter-groupes

L'alimentation, la taille de l'enclos, le type de substrat, la densité de population, l'âge et la masse corporelle des individus, ainsi que le dimorphisme sexuel sont des sources potentielles de variabilité morphologique dans l'appareil locomoteur.

#### 3.3.1 Alimentation

L'alimentation peut avoir eu un impact sur la croissance des groupes échantillonnés. En effet, les trois groupes bénéficient d'une base alimentaire commune à base de grains et de farines alimentaires. Les porcs biologiques et les sangliers ont en plus accès aux rejets de production maraîchère locale. Enfin, les sangliers peuvent exploiter la végétation présente dans leurs enclos de forêt clôturée à des fins alimentaires. Les sangliers et porcs biologiques bénéficient donc d'une alimentation potentiellement plus riche et diversifiée que le porc conventionnel, et ce avec moins de contrôle ou restrictions à l'accès sur une base individuelle. Des recherches sur le mouton — *Ovis ares* — et le daim — *Dama dama* — ont déterminé qu'une différence dans l'alimentation influe sur le développement squelettique, mais cette influence est peu significative au niveau des os courts (Piasentier, Saccà, and Bovolenta 2007, Popkin et al. 2012). De même, bien qu'une différence existe bel et bien entre les régimes alimentaires des groupes étudiés, leurs régimes alimentaires répondent à tous les besoins caloriques de l'animal, invariablement du mode d'élevage, les surplus étant stockés sous la forme de masse grasse et de masse musculaire.

#### 3.3.2 Substrat

Le type de substrat constitue un facteur environnemental ayant une influence directe sur la nature des charges imposées à l'appareil locomoteur. Le substrat bétonné du porc conventionnel fournit moins d'absorption au niveau des chocs et la nature abrasive de la surface maintient la longueur des sabots à un minimum. Les substrats de litière végétale du porc biologique ou les sols naturels du sanglier absorbent les chocs et permettent la croissance de sabots plus longs due au niveau d'abrasion réduite comparativement au béton. Par le fait

même, ces sabots allongés permettent, en augmentant la surface de contact, de mieux soutenir la masse de l'animal sur un substrat offrant moins de support. Ces différences de croissance du sabot influencent aussi l'angle de la patte, et donc l'amplitude mécanique requise au niveau articulaire, ainsi que les besoins mécaniques lors de la locomotion.

Le type de substrat constitue probablement dans cette étude la variable la plus importante après le taux de mobilité dans le complexe écomorphologique de l'astragale.

### 3.3.3 Âge, masse, et sexe

Puisque les populations de porcs utilisées ont le même âge et le même poids à l'abattage les questions de tailles et de stade développemental influant les résultats observés ne s'appliquent pas. Toutefois, ils constituent des questions vitales dans l'applicabilité de la méthode à un plus large éventail de suidés.

Le développement de l'astragale à partir d'un unique centre d'ossification contribue à ce qu'il conserve les mêmes proportions relatives au cours du développement de l'animal (Currey 2002, Popkin et al. 2012, Zeder, Lemoine, and Payne 2015). De même, l'astragale est un bon estimateur de la masse d'un individu (Bishop 1994). Enfin, le dimorphisme sexuel est plus prononcé au niveau crânien et tend à diminuer au niveau des extrémités appendiculaires. De fait, les recherches faites sur le mouton — *Ovis ares* — n'ont pas observé de différences significatives au niveau de la forme de l'astragale entre les sexes et les castrats (Davis 2000, Popkin et al. 2012).

Enfin, la locomotion et les préférences environnementales sont considérées comme des influences plus significatives sur le développement de la morphologie de l'appareil locomoteur que les variations d'âge, de sexe, de masse, et d'alimentation (Kappelman 1988, Bishop 1994). Il est donc considéré que toute variation observée serait liée au type d'enclos et la densité de population (affectant le taux de mobilité) ou au type de substrat.

### 3.4 Pathologies, lésions, malformations

Au cours de la préparation des pattes collectées, six individus inclus dans la recherche présentaient des signes pathologiques ou des lésions. Il ne fut pas possible d'attribuer les lésions superficielles ou les fractures — surtout observées au niveau des métatarses accessoires 2 et 4 — à un quelconque événement *antemortem* et les individus furent tout de même inclus dans l'échantillon. Quatre sangliers et un porc biologique présentent une fusion au niveau dorso-postérieur des os cuboïde et naviculaire ; ces os forment le complexe en articulation avec la portion distale de l'astragale. La variation dans le niveau de flexibilité articulaire n'est pas attestée et ne semble pas porter un poids significatif dans la classification des individus concernés. Enfin, un porc biologique présentait une pathologie osseuse notable au niveau des phalanges distales et proximales latérales — doigt 4 — où les éléments étaient quasi fusionnés avec une production importante d'ostéophytes ; l'astragale, indemne, fut conservé pour l'analyse. Ces individus ne se distinguent pas du reste de leurs groupes dans les analyses.

Un certain nombre d'astragales de porcs conventionnels et biologiques présentaient une malformation au niveau de l'articulation proximale où le condyle latéral était manquant. Les fonctions de la portion manquante de l'os semblent toutefois avoir été remplies par du cartilage articulaire supplémentaire au niveau de la malformation. L'articulation distale du tibia de ces individus — lorsque présente dans la coupe — ne semblait pas affectée par la malformation. Ces individus furent toutefois rejetés à l'étape de la préparation des pattes et ne sont donc pas inclus dans l'analyse.

### 3.5.2 Condition d'élevage des populations échantillonnées

#### 3.5.2.1 Sanglier (Groupe 1)

Les sangliers sont issus d'élevages exclusivement biologiques ; leur élevage se fait dans des enclos extérieurs et ils sont nourris avec un mélange de farine alimentaire, de maïs et des céréales, en plus de rejets de productions maraîchères locales, et d'une part d'alimentation naturelle en place dans les enclos extérieurs de boisés clôturés. Les sangliers inclus dans



l'échantillon à l'étude ont passé les quatre premiers mois de leur vie en zone boisée — soit une zone boisée de deux âres (environ 8000 m<sup>2</sup>) clôturée — en cohabitation avec les laies avant d'être mis dans de grands enclos déboisés d'environ 2500 m<sup>2</sup>. Le substrat vaseux et rocaillieux demeure le même entre les deux types d'enclos ; la différence entre les enclos réside dans la présence d'arbres et d'arbres morts jonchant le sol de l'enclos boisé.

L'échantillon de sangliers compte 25 individus et provient de deux producteurs voisins. Les sangliers sont issus d'une même population biologique (mêmes mâles reproducteurs et échanges au niveau des laies). La collecte s'est faite au rythme des abattages par les éleveurs. La maturité sexuelle est atteinte aux environs de 10 mois et les sangliers sont abattus aux environs de 14 à 16 mois, soit lorsqu'ils atteignent un poids avoisinant les 45 kg. Les animaux composant l'échantillon furent abattus sur une période de moins de six mois, soit entre décembre 2015 et mai 2016. La saison d'abattage varie, mais ne devrait pas affecter notre étude, tous les animaux ayant vécu un cycle annuel complet.

#### 3.5.2.2 Porc d'élevage conventionnel (Groupe 2)

Ce porc est issu d'un élevage sans antibiotiques et est nourri de grains. Les bêtes sont gardées en enclos sur un sol de lattes bétonnées.

La maturité sexuelle est atteinte vers cinq à six mois, soit l'âge approximatif auquel les animaux sont abattus. Les 28 individus échantillonnés au hasard parmi les 189 porcs abattus le 2016-02-09 proviennent d'un seul producteur. Le poids vif moyen des porcs conventionnels était de 124.42 kg.

#### 3.5.2.3 Porc d'élevage biologique (Groupe 3)

L'élevage de ce porc se fait avec une alimentation de grains sans OGM et sans antibiotiques. L'élevage se fait sur litière dans des enclos d'une dimension d'environ 60 à 75 m<sup>2</sup> pour le premier mois de vie, puis des enclos de près de 150 m<sup>2</sup> pour chaque groupe d'âge d'environ 60 individus suite au sevrage et jusqu'à l'âge de 5 mois quand ils ont été abattus.

Les bêtes ont un accès à un enclos extérieur suite au sevrage via des corridors aménagés à même les enclos.

L'échantillon de porc biologique compte 24 individus échantillonnés au hasard parmi les 191 porcs abattus le 2016-11-10 et provenant d'un seul producteur. Le poids vif moyen des porcs biologiques était de 122.81 kg. L'âge approximatif à l'abattage est de cinq mois.

### 3.5.3 Collecte et préparation des spécimens

Le producteur de porcs a accepté de nous fournir des pattes de porcs provenant des élevages conventionnel et biologique. Les informations quant aux modèles d'élevage ont été obtenues via des échanges de courriels, des échanges téléphoniques, ainsi que par des visites sur les lieux d'élevage en compagnie des producteurs. Des arrangements furent mis en place afin de collecter les pattes de manière standardisée en fonction des calendriers de production et d'abattage. Les pattes furent récoltées après implantation d'une coupe n'affectant pas l'astragale (v. fig. 1, ci-contre).

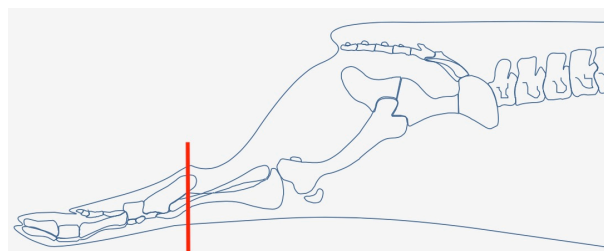


Figure 1. Coupe du pied collectée

À la réception les pattes furent décharnées, dégraissées, et marquées. Les pattes furent d'abord mijotées dans un bain d'eau pour quelques heures jusqu'au détachement de la chair et relâchement des tendons et ligaments, suite à quoi les os furent transférés dans des sachets de coton à fromage et dégraissés dans une eau frémissante jusqu'à un niveau de dégraissage subjectivement jugé adéquat. Le temps de dégraissage varia grandement entre les groupes et selon le nombre de pattes traités simultanément, mais fut au minimum de cinq heures. Après un nettoyage à l'eau savonneuse et brosse douce, les os furent mis en bacs d'eau savonneuse à température ambiante pour au moins une semaine afin de les dégraisser encore plus. Finalement, les os furent mis à sécher avant d'être marqués et préparés pour la collecte des données ostéométriques.

Un tableau inventoriant l'ensemble des astragales préparés figure en annexe 1.

### 3.6 Collecte de données ostéométriques linéaires et 3D

#### 3.6.1 Mesures linéaires et ratios

Dans un premier temps, les os nettoyés ont été mesurés au pied à coulisse avec une précision de 0.02 mm en suivant les mesures proposées par Bishop (1994, 198-199) (v. fig. 2, p. 34 ; tab. I, p. 32). À ces mesures s'ajoutent deux mesures tridimensionnelles décrites plus bas. L'ensemble des mesures obtenues est utilisé dans le calcul de ratios (v. tab. II, p. 33). Les tables contenant les mesures et les ratios pour chaque individu sont inclus en annexes (annexes 5 à 10). Les mesures proposées par Bishop (1994) diffèrent des mesures habituellement utilisées pour l'astragale et sont plus nombreuses que celles utilisées pour les bovidés et cervidés (von Den Driesch 1976). Les mesures de Bishop sont largement plus exhaustives afin de couvrir un maximum de structures morphologiques. Par exemple, l'astragale de suidés présente des « torsions » autour des axes longitudinal (bien visible sur la vue B de la fig. 2, p. 34) et antéro-postérieur (bien visible sur la vue A-C de la fig. 2, p. 34) alors qu'il est plus orthogonal chez les autres artiodactyles (DeGusta and Vrba 2003). Cette morphologie particulière aux suidés nécessite plus de mesures, ne serait-ce qu'au niveau latéro-médial, et proximo-distal.

Mesure	Description
1 – LATLEN	Longueur de la portion latérale.
2 – MEDLEN	Longueur de la portion médiale.
3 – TIRTMLT	Largeur de l'articulation tibiale.
4 – TIRTMLL	Largeur de la portion latérale de l'articulation tibiale.
5 – TIRTMLM	Largeur de la portion médiale de l'articulation tibiale.
6 – TARSMILT	Largeur de l'articulation tarsienne.
7 – TARSMILL	Largeur de la portion latérale de l'articulation tarsienne.
8 – TARSMILM	Largeur de la portion médiale de l'articulation tarsienne.
9 – TALRML	Bordure latérale de l'articulation tarsienne jusqu'à l'arrêt.
10 – TARMML	Arrêt de l'articulation tarsienne jusqu'au point central.
11 – TALAP	Profondeur de la portion latérale de l'articulation tarsienne.
12 – TAMAP	Profondeur de la portion médiale de l'articulation tarsienne.
13 – TIMAP	Longueur de la portion médiale de l'articulation tibiale.
14 – TILAP	Longueur de la portion latérale de l'articulation tibiale.
15 – TICAP	Longueur minimale de l'articulation tibiale.
16 – PCFLAP	Longueur latérale de la facette calcanéaire postérieur.
17 – PCFMAP	Longueur médiale de la facette calcanéaire postérieur.
18 – PCFML	Largeur de la facette calcanéaire postérieur.
19 – MAXML	Largeur maximale.
20 – MAXSI	Profondeur maximale.
21 – MAXLEN	Longueur maximale. Mesure la plus longue prise précédemment.
22 – MINLEN	Longueur minimale.
23 – LCFPAP	Longueur de la facette calcanéaire proximo-latérale.
24 – LCFPSI	Profondeur de la facette calcanéaire proximo-latérale.
25 – LCFDAP	Longueur de la facette calcanéaire disto-latérale.
26 – LCFDSI	Profondeur de la facette calcanéaire disto-latérale.
27 – TUBTIBA	Mesure de la tubérosité fibulaire à l'articulation tibiale.
28 - 2RCPS	Diamètre de la sphère appliquée à la surface calcanéaire postérieur.

Tableau I. Liste des mesures linéaires prises au pied à coulisse (1 à 27) et de la mesure tridimensionnelles 28 avec leurs descriptions respectives.

Ratio	Mesures
LENRAT	2/1
TATIMLR	3/6
TIRTRAT	4/5
TARSRAT	7/8
TALRAT	9/10
TARAT	11/12
TIRAT	14/13
PCFRAT	17/16
PCFRAT2	18/16
PCFRAT3	18/17
MLRAT	3/19
SIRAT	14/20
LENRAT3	22/21
LENRAT2	22/1
TTRAT	27/15
TITA1	14/11
TITA2	13/12
TALRAT2	9/6
TIRAT2	14/22
TIRAT3	13/22
PCFCURV*	29/16
PCFCURV2*	29/17
PCFCURV3*	29/18
PCFCURV4*	29/20
PCFCURV5*	29/21
PCFCURV6*	29/22

Tableau II. Liste et définition des ratios proposés par Bishop (1994) utilisés dans la présente recherche.

\*Ratios basés sur les mesures tridimensionnelles.

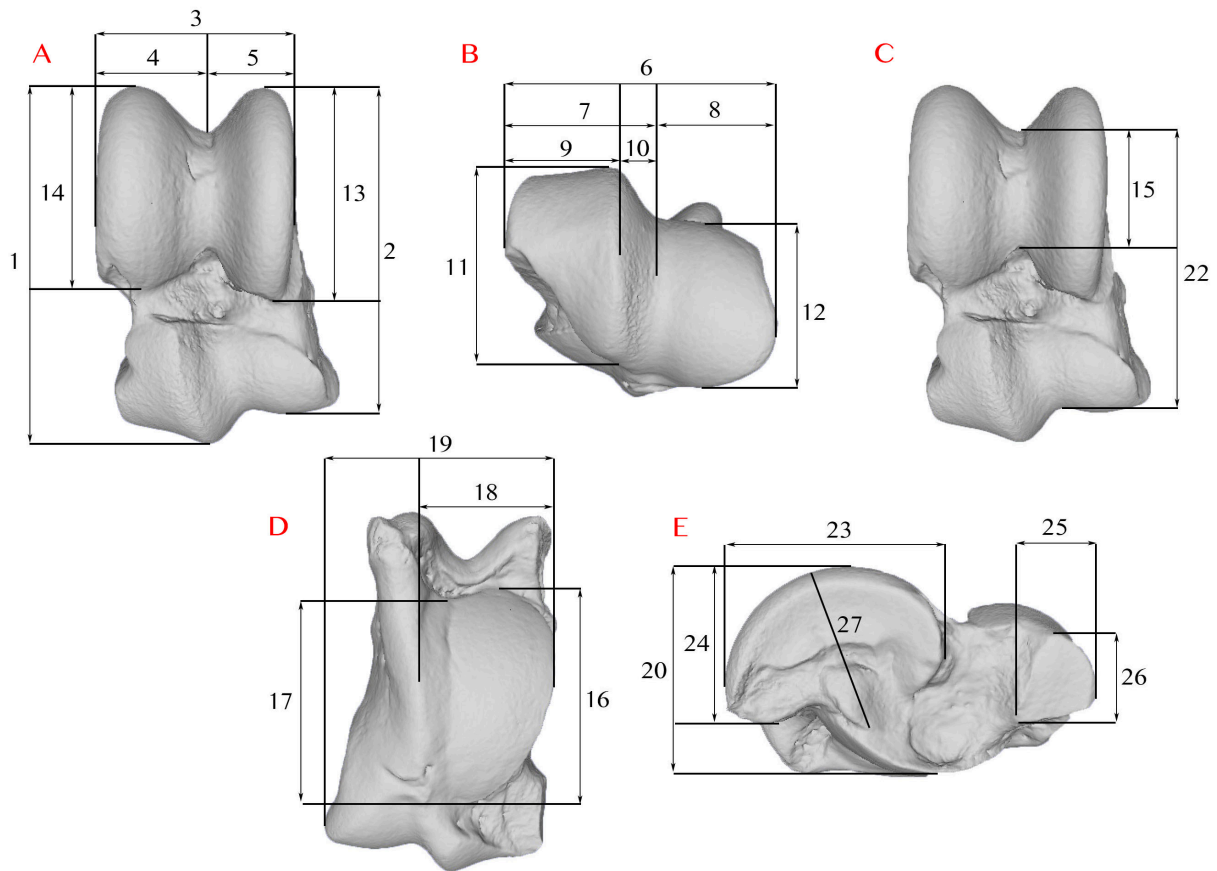


Figure 2. Mesures linéaires. Astragale droit illustré. A-C = vue antérieure; B = vue distale; D = vue postérieure; E = vue latérale

### 3.6.2 Mesures tridimensionnelles

La numérisation tridimensionnelle au laser s'est faite à l'aide du numériseur *3D Scanner Ultra HD* de marque *NextEngine*. Ce processus vise à enregistrer les reliefs, les dimensions, et les textures et couleurs des astragales préparés par l'amalgame d'une série de numérisations afin de construire un modèle tridimensionnel fidèle à la morphologie de l'os (Bernardini and Rushmeier 2002).

Chaque astragale fut numérisé en deux passages de 16 captures sur 360° à la résolution la plus élevée — 160 000 points par pouces carrés — en mode macro. Le premier passage fut fait avec la pointe dorsale du condyle latéral de l'articulation tibiale reposant sur le plateau de numérisation, et la pointe médio-distale de l'articulation tarsienne maintenue vers le haut par le support de la table de numérisation (v. fig. 2, ci-haut). Le second balayage se faisait avec

l'astragale reposant sur sa face crâniale et stabilisée par le support au niveau de l'articulation calcanéale postérieure.

Suite à la numérisation, les modèles sont alignés et fusionnés avec le logiciel de traitement de modèle de NextEngine et exportés en format. *obj*.

L'objet tridimensionnel est ensuite importé dans le logiciel *Geomagic Control V2014.1.0.1706*. À l'aide de l'outil de sélection, la facette articulaire calcanéaire postérieure est sélectionnée en cherchant à couvrir un maximum de la surface en question en favorisant la zone centrale (v. fig. 3, ci-contre). Par la suite, un cylindre et une sphère de tailles variables sont ajustés à la surface sélectionnée en mode *Best fit*. Le diamètre de la sphère est relevé (v. fig. 4, ci-dessous) sous l'abréviation 2RCPS (mesure 28). Bien que la mesure basée sur le cylindre fut prise pour l'ensemble des individus, l'orientation de la forme s'est avérée inadéquate dans une certaine proportion de l'échantillon, soit à 90 ° de ce qui peut être considéré comme la normale, ou l'axe de la surface articulaire. Pour cette raison, les ratios supplémentaires — PCFCURV à PCFCURV6 — utilisent la mesure 28.

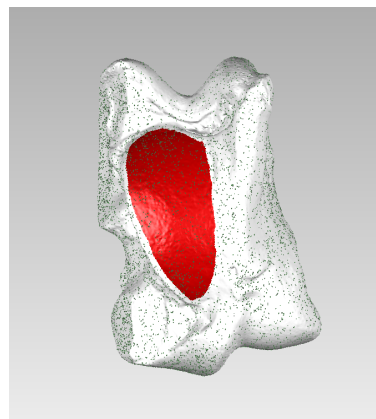


Figure 3. Surface articulaire postérieure isolée.

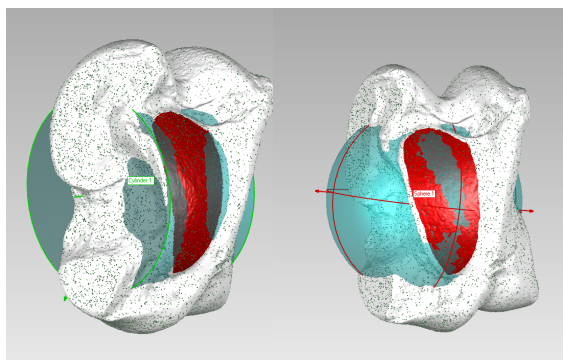


Figure 4. Cylindre à gauche, sphère à droite.

La mesure du diamètre de la sphère sur le modèle tridimensionnel ne fut pas sujette au test de T à échantillons appariés comme ce fut le cas pour les mesures linéaires. La zone de recoupement optimal de la sphère avec la surface articulaire postérieure sélectionnée ne change pas, même lorsque les limites de la sélection sont réduites. Une sélection sommaire de la surface est suffisante pour obtenir une bonne application de la sphère. L'unique différence soulevée entre plusieurs tentatives est le nombre absolu de points de recoupement qui est directement lié à l'étendue de la sélection.

### 3.7 Analyses statistiques

Les analyses statistiques furent exécutées à l'aide du logiciel *SPSS Statistics V. 24.0.0.0*. Un script *R* fut aussi utilisé dans *R Studio* afin d'élaguer les variables corrélées (annexe 11) (v. section 3.7.2.2). Préalablement nous avons exclu les variables qui ne répondent pas aux conditions d'applicabilité des analyses décrites ci-dessous.

#### 3.7.1 Variation intraobservateur

Afin d'assurer la reproductibilité des mesures, quatre individus par groupe ont été choisis au hasard et l'ensemble des mesures linéaires ont été prises une seconde fois. Les deux séries de mesures ont été comparées à l'aide d'un test de T à échantillon appariés avec un seuil de signification de  $p=0.05$  (Bartlett and Frost 2008).

Le test T étant non significatif au seuil  $p=0.05$  pour l'ensemble des 12 paires contrôlées (v. annexe 1), les mesures linéaires sont jugées fiables d'un individu à l'autre.

#### 3.7.2 Conditions d'applicabilité des analyses

##### 3.7.2.1 Taille des échantillons

L'échantillon de sangliers compte 25 individus, le porc conventionnel 28, et le porc biologique 21, pour un total de 74 individus. Le nombre de variables maximal pour l'analyse discriminante linéaire est donc de 20 variables ( $N=21-1$ ). Une réduction du nombre de variables, autant pour les mesures linéaires que les ratios, est impérative à l'élaboration d'une méthode efficace et aisément reproductible. Cette réduction fut effectuée à travers la sélection des variables conformes aux conditions d'applicabilité de l'analyse qui suivent.

##### 3.7.2.2 Non-multicolinéarité

La corrélation entre différentes variables peut influencer les résultats de l'analyse discriminante linéaire. Les données furent donc analysées à l'aide d'un script en *R* afin d'identifier et d'éliminer les valeurs corrélées au-delà d'un seuil arbitraire de 0.7. Cette analyse fut effectuée sur les trois populations à l'étude.



L'analyse de corrélations générée dans R (tableau en annexe) permet d'éliminer 21 mesures linéaires et 3D et de ne conserver que sept variables, soit : 1, 2, 3, 9, 11, 18, et 26 (LATLEN, MEDLEN, TIRTMLT, TALRML, TALAP, PCFML, LCFDSI) (v. fig. 2, p. 34 ; tab. I, p. 32).

Cette même analyse appliquée aux ratios élimine huit ratios pour en conserver 18, soit : LENRAT, TATIMLR, TIRTRAT, TARSRAT, TALRAT, TARAT, TIRAT, PCFRAT, PCFRAT2, PCFRAT3, SIRAT, LENRAT3, LENRAT2, TITA1, TITA2, TALRAT, TIRAT2, et PCFCURV4 (v. tab. II, p. 33).

### 3.7.2.3 Normalité des distributions

Les distributions des valeurs pour chaque variable (par groupe échantillonné) doivent idéalement suivre une distribution normale. Cette condition fut testée à l'aide du test Shapiro-Wilk à un seuil de  $p \leq 0.05$ . Les variables qui n'ont pas une distribution normale ne furent donc pas retenues dans les analyses discriminantes linéaires subséquentes.

Le tableau IV correspond aux tests menés sur les mesures linéaires, et le tableau V correspond aux tests menés sur les ratios. Les variables rejetées sont affichées en rouge. Des variables supplémentaires furent retirées par ordre de Sig. afin de rendre les tests du M de Box valides ; ces variables sont affichées en jaune.

### 3.7.2.4 Homogénéité des variances/covariances

L'homogénéité des variances et covariances fut testée à l'aide du test du M de Box en SPSS. Bien que la communauté des statisticiens (<https://stats.stackexchange.com/>) ne s'accorde pas sur le seuil de signification à utiliser et la sensibilité du test, le seuil  $p \leq 0.05$  est d'usage et fut utilisé. Les variables dont les covariances ne sont pas homogènes furent écartées de l'analyse.

### 3.7.3 Analyses discriminantes linéaires

Les analyses discriminantes linéaires ont toutes été effectuées selon les mêmes paramètres. La variable de regroupement est les trois différents groupes de porcs et sangliers, les variables indépendantes sont les mesures ou ratios à analyser. La méthode statistique stepwise est utilisée en se basant sur la distance de Mahalanobis avec un seuil d'intégration à  $F=0.05$  et un seuil de rejet à  $F=0.10$ . Une classification par validation croisée est exigée pour l'ensemble des analyses où chaque spécimen est repassé dans l'analyse discriminante linéaire excluant les valeurs associées à celui-ci.

Une première paire d'analyses — sur les mesures linéaires et sur les ratios — fut effectuée en identifiant que les deux groupes de porcs (Group 2 et Group 3) dans l'analyse, les sangliers (Group 1) représentant un groupe externe servant à tester les résultats. Cette analyse teste notre hypothèse principale voulant que le taux de mobilité d'un individu et la morphologie de l'astragale soient liés de manière significative. L'hypothèse de classification du sanglier dans ce cas serait que celui-ci se range du côté du porc biologique (Group 3) puisque ce dernier est plus mobile que son homologue conventionnel (Group 2).

Les analyses linéaires discriminantes sur les mesures linéaires et les ratios sont ensuite reprises en incluant les sangliers comme troisième groupe (Group 1) identifié. Ceci a pour but de tester notre hypothèse portant sur les différences interpopulationnelles.

### 3.7.4 Test de TAU de correction de classification aléatoire

Les analyses discriminantes linéaires conduites sur les trois groupes furent soumises à un test de TAU tel que proposé par Kovarovic *et al.* (2011). Pour ce test :  $N$  = taille totale de l'échantillon ;  $N_c$  = nombre total de cas correctement classés par l'analyse discriminante linéaire ;  $P_i$  = probabilité initiale d'appartenance à chacun des  $G$  groupes ;  $N_i$  = nombre de cas classés dans chacun des  $G$  groupes. Le TAU obtenu correspond à la classification validée croisée corrigée pour tenir compte de la classification aléatoire. Un TAU se rapprochant ou étant inférieur aux taux de classification aléatoire — 33 % pour trois groupes ou 50 % pour

deux — indique que la l'analyse discriminante linéaire ne se distingue pas entre une classification aléatoire.

$$TAU = \left( N_c - \sum_{i=1,G} P_i \times N_i \right) / \left( N - \sum_{i=1,G} P_i \times N_i \right)$$

### 3.8.1 Comparaison avec les données écomorphologiques de Bishop (1994)

Bishop (1994) se penche sur l'écomorphologie des suidés africains en proposant que l'ouverture de l'environnement liée au type de couverture végétale (v. Chapitre 1). À cette fin, elle exploita l'ensemble des os appendiculaires de suidés modernes et archéologiques. Les ratios identifiés par Bishop pour l'astragale (Bishop 1994, 195-202) furent calculés sur l'échantillon de cette recherche à des fins de comparaison. Le but de cette comparaison est de tester l'hypothèse selon laquelle le signal associé à une mobilité plus grande est corrélé au signal d'un habitat ouvert. Pour ce faire, les neuf ratios utilisés par Bishop pour identifier le type d'environnement — PCFRAT, PCFRAT2, PCFRAT3, TTRAT, TIRTRAT, MLRAT, TATIMLR, TITA1, et TITA2 — ont été repris afin de tester la distribution des valeurs pour les trois populations de notre échantillon ayant des taux de mobilité différents.

Des analyses discriminantes linéaires furent faites sur les neuf ratios identifiés par Bishop afin de voir si une séparation des groupes liée au taux de mobilité de nos porcs est observable, dans lequel cas le signal observé par Bishop serait potentiellement lié au degré de mobilité des suidés influencé, à son tour, par l'ouverture de l'environnement.

## Chapitre 4 — Résultats

### 4.1 Analyses discriminantes linéaires à deux groupes

#### 4.1.1 Mesures linéaires porcs

Dans un premier temps, l'analyse des variables dans R permet en une étape d'éliminer 21 des mesures linéaires et 3D, ne conservant donc que sept variables, soit les mesures 1, 2, 3, 9, 11, 18, et 26 (LATLEN, MEDLEN, TIRTMLT, TALRML, TALAP, PCFML, LCFDSI).

Par la suite, le test de normalité Shapiro-Wilk (v. annexe 2) élimine deux variables supplémentaires, soit les mesures 9 et 26 qui ne sont pas distribuées normalement chez le porc conventionnel.

En utilisant les cinq variables restantes (1, 2, 3, 11, 28), le test du M de Box (v. tab. III, ci-dessous) fut non significatif à  $p=0.497$ . Il est donc possible de poursuivre avec l'analyse discriminante linéaire.

L'analyse discriminante linéaire fut effectuée en identifiant les porcs conventionnels et les porcs biologiques comme groupes de référence ; les sangliers constituèrent le groupe test pour cette analyse. Les variables 3, 2, 18, et 11 sont retenues dans l'analyse (v. tab. IV, p. 41). Enfin, les résultats de la classification (v. tab. V, p. 42) sont concluants à 93.9 % en classification observée ainsi qu'en validation croisée.

L'indice TAU pour cette analyse est de 87.50 %.

**Test Results**

Box's M		10.362
F	Approx.	0.937
	df1	10
	df2	8741.049
	Sig.	0.497
Tests null hypothesis of equal population covariance matrices.		

Tableau III. Test du M de Box sur les mesures linéaires pour les porcs.

**Variables Entered/Removed a,b,c,d**

Step	Entered	Min. D Squared					
		Statistic	Between Groups	Exact F			
				Statistic	df1	df2	Sig.
1	TIRTMLT3	3.953	2.00 and 3.00	47.439	1	47.000	1.210E-08
2	MEDLEN2	6.447	2.00 and 3.00	37.859	2	46.000	1.907E-10
3	PCFML18	7.424	2.00 and 3.00	28.433	3	45.000	1.818E-10
4	TALAP11	8.543	2.00 and 3.00	23.993	4	44.000	1.411E-10
At each step, the variable that maximizes the Mahalanobis distance between the two closest groups is entered.							
a. Maximum number of steps is 10.							
b. Maximum significance of F to enter is .05.							
c. Minimum significance of F to remove is .10.							
d. F level, tolerance, or VIN insufficient for further computation.							

Tableau IV. Mesures linéaires retenues dans l'analyse discriminante linéaire sur les porcs.

### Classification Results a,c

Group			Predicted Group Membership		Total
			2,00	3,00	
Original	Count	2,00	26	2	28
		3,00	1	20	21
		Ungrouped cases	1	24	25
	%	2,00	92.9	7.1	100.0
		3,00	4.8	95.2	100.0
		Ungrouped cases	4.0	96.0	100.0
Cross-validated b	Count	2,00	26	2	28
		3,00	1	20	21
	%	2,00	92.9	7.1	100.0
		3,00	4.8	95.2	100.0
a. 93.9% of original grouped cases correctly classified.					
b. Cross validation is done only for those cases in the analysis. In cross validation, each case is classified by the functions derived from all cases other than that case.					
c. 93.9% of cross-validated grouped cases correctly classified.					

Tableau V. Résultats de la classification effectuée par l'analyse discriminante linéaire sur les mesures linéaires pour les porcs.

#### 4.1.2 Ratios porcs

Le test de normalité Shapiro-Wilk élimine sept ratios supplémentaires (v. annexe 3) qui ne suivent pas une distribution normale chez le porc conventionnel — deux de ceux-ci, LENRAT3 et LENRAT2, sont également éliminés chez le porc biologique.

Lorsque testé avec les 11 ratios restants, le test du M de Box (v. tab. VI, p. 43) est non significatif à  $p=0.125$  et l'analyse discriminante linéaire est donc applicable.

Enfin, l'analyse discriminante linéaire en n'identifiant que les porcs ne conserve que quatre ratios, soit TARAT, TARSRAT, PCFRAT, et TIRTRAT (v. tab. VII, p. 43). Les résultats de la classification sont positifs à 98.0 % en classification initiale et à 95.9 % en validation croisée (v. tab. VIII, p. 44).

L'indice TAU pour cette analyse est de 91.67 %.

### Test Results

Box's M		16.810
F	Approx.	1.521
	df1	10
	df2	8741.049
	Sig.	0.125
Tests null hypothesis of equal population covariance matrices.		

Tableau VI. Test du M de Box sur les ratios pour les porcs.

### Variables Entered/Removed a,b,c,d

Step	Entered	Min. D Squared					
		Statistic	Between Groups	Exact F			
				Statistic	df1	df2	Sig.
1	TARAT	2.614	2.00 and 3.00	31.369	1	47.000	1.076E-06
2	TARSRAT	5.726	2.00 and 3.00	33.626	2	46.000	1.001E-09
3	PCFRAT	8.543	2.00 and 3.00	32.719	3	45.000	2.236E-11
4	TIRTRAT	10.895	2.00 and 3.00	30.598	4	44.000	3.359E-12
At each step, the variable that maximizes the Mahalanobis distance between the two closest groups is entered.							
a. Maximum number of steps is 22.							
b. Maximum significance of F to enter is .05.							
c. Minimum significance of F to remove is .10.							
d. F level, tolerance, or VIN insufficient for further computation.							

Tableau VII. Ratios retenus dans l'analyse discriminante linéaire pour les porcs.

### Classification Results a,c

Group			Predicted Group Membership		Total
			2,00	3,00	
Original	Count	2,00	27	1	28
		3,00	0	21	21
		Ungrouped cases	9	19	28
	%	2,00	96.4	3.6	100.0
		3,00	0.0	100.0	100.0
		Ungrouped cases	32.1	67.9	100.0
Cross-validated b	Count	2,00	27	1	28
		3,00	1	20	21
	%	2,00	96.4	3.6	100.0
		3,00	4.8	95.2	100.0
		a. 98.0% of original grouped cases correctly classified.			
b. Cross validation is done only for those cases in the analysis. In cross validation, each case is classified by the functions derived from all cases other than that case.					
c. 95.9% of cross-validated grouped cases correctly classified.					

Tableau VIII. Résultats de la classification effectuée par l'analyse discriminante linéaire sur les ratios pour les porcs.

## 4.2 Analyses discriminantes linéaires à trois groupes

### 4.2.1 Mesures linéaires trois groupes

Par la suite, le test de normalité Shapiro-Wilk (v. annexe 2) élimine trois variables supplémentaires, soit les mesures 3, 9 et 26. La variable TALAP fut également retirée puisque celle-ci est à  $p=0.199$  chez le sanglier dans le test Shapiro-Wilk (v. annexe 2).

En utilisant dès lors uniquement les mesures 1, 2, et 18, le test du M de Box (v. tab. IX, p. 45) est non significatif à  $p=0.068$  et il est possible de poursuivre l'analyse discriminante linéaire. Ces mêmes mesures sont retenues dans l'analyse discriminante linéaire (v. tab. X, p. 45)

Les résultats de l'analyse discriminante permettent de classer 89.2 % des individus correctement en classification observée comme en validation croisée (v. tab. XI, p. 46 ; v. fig. 5, p. 47). Le TAU pour cette analyse atteint 83.67 %.



### Test Results

Box's M		21.276
F	Approx.	1.662
	df1	12
	df2	21429.559
	Sig.	0.068
Tests null hypothesis of equal population covariance matrices.		

Tableau IX. Test du M de Box sur les mesures linéaires pour les trois groupes.

### Variables Entered/Removed a,b,c,d

Step	Entered	Min. D Squared					
		Statistic	Between Groups	Exact F			
				Statistic	df1	df2	Sig.
1	PCFML18	2.443	2,00 and 3,00	29.312	1	71.000	7.945E-07
2	MEDLEN2	4.243	2,00 and 3,00	25.100	2	70.000	6.050E-09
3	LATLEN1	4.468	2,00 and 3,00	17.368	3	69.000	1.668E-08
At each step, the variable that maximizes the Mahalanobis distance between the two closest groups is entered.							
a. Maximum number of steps is 6.							
b. Maximum significance of F to enter is .05.							
c. Minimum significance of F to remove is .10.							
d. F level, tolerance, or VIN insufficient for further computation.							

Tableau X. Mesures linéaires retenues pour les trois groupes dans l'analyse discriminante linéaire.

### Classification Results a,c

Group			Predicted Group Membership			Total
			1,00	2,00	3,00	
Original	Count	1,00	25	0	0	25
		2,00	0	23	5	28
		3,00	0	3	18	21
	%	1,00	100.0	0.0	0.0	100.0
		2,00	0.0	82.1	17.9	100.0
		3,00	0.0	14.3	85.7	100.0
Cross-validated b	Count	1,00	25	0	0	25
		2,00	0	23	5	28
		3,00	0	3	18	21
	%	1,00	100.0	0.0	0.0	100.0
		2,00	0.0	82.1	17.9	100.0
		3,00	0.0	14.3	85.7	100.0
a. 89,2% of original grouped cases correctly classified.						
b. Cross validation is done only for those cases in the analysis. In cross validation, each case is classified by the functions derived from all cases other than that case.						
c. 89,2% of cross-validated grouped cases correctly classified.						

Tableau XI. Résultats de la classification effectuée par l'analyse discriminante linéaire sur les mesures linéaires pour les trois groupes.

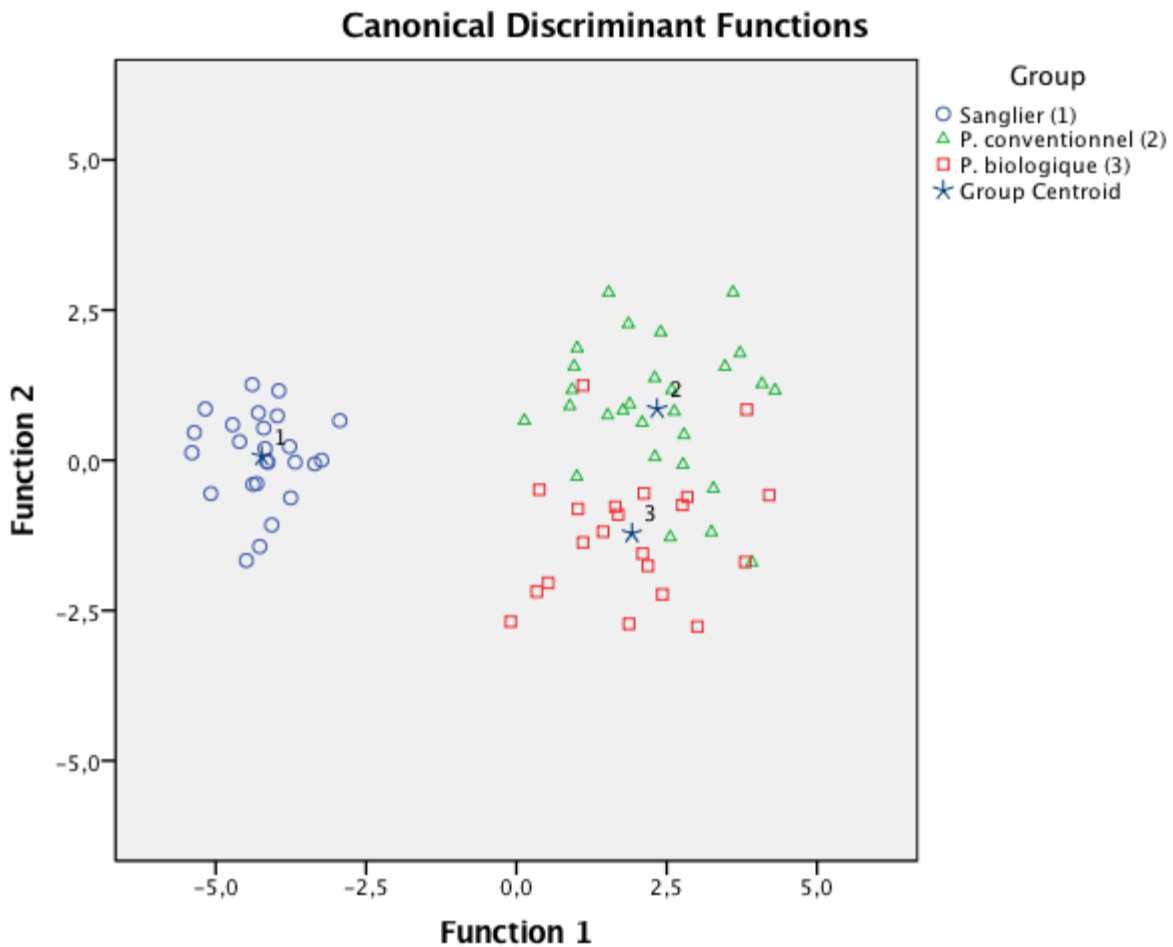


Figure 5. Nuages de points de l'analyse discriminante linéaire sur mesures linéaires à trois groupes

#### 4.2.2 Ratios trois groupes

L'analyse de corrélation dans R élimine huit ratios, n'en conservant que 18.

Le test de normalité Shapiro-Wilk élimine huit ratios supplémentaires (v. annexe 3) qui ne suivent pas une distribution normale.

Lorsque testé avec les dix ratios restants, le test du M de Box est significatif à  $p=0.000$ . Des ratios supplémentaires furent retirés par ordre ascendant de signifiacnce dans le test Shapiro-Wilk jusqu'à l'obtention d'un test du M de Box non significatif. Par cette procédure, cinq ratios furent retirés, soit PCFRAT2 ( $p=0.068$  sanglier), TALRAT2 ( $p=0.070$  porc conventionnel), TARSRAT ( $p=0.080$  sanglier), PCFRAT ( $p=0.123$  porc biologique), et SIRAT ( $p=0.133$  sanglier) (v. annexe 3).

En utilisant les cinq ratios restants — TIRTRAT, TALRAT, TARAT, PCFRAT3, et TITA1 — le test du M de Box (v. tab. XII, ci-dessous) est non significatif à  $p=0.191$  et il est possible de poursuivre avec l'analyse discriminante linéaire.

L'analyse discriminante linéaire n'utilise que trois des cinq ratios sélectionnés (v. tab. XIII, p. 49), soit TARAT, TIRTRAT, et PCFRAT3. La classification (v. tab. XIV, p. 50 ; v. fig. 6, p. 51) issue de l'analyse est efficace à 66.2 % en classification observée et 63.5 % en validation croisée, soit une très nette diminution comparativement aux mesures linéaires, ce qui est également très clairement visible dans les nuages de points de la figure 6 (p.51). Il est toutefois intéressant de constater que les recouvrements les plus importants sont entre le sanglier et le porc biologique.

Le TAU pour les ratios est de 48.98 %.

Test Results		
Box's M		17.080
F	Approx.	1.334
	df1	12
	df2	21429.559
	Sig.	0.191
Tests null hypothesis of equal population covariance matrices.		

Tableau XII. Test du M de Box sur les ratios pour les trois groupes.

**Variables Entered/Removed a,b,c,d**

Step	Entered	Min. D Squared					
		Statistic	Between Groups	Exact F			
				Statistic	df1	df2	Sig.
1	TARAT	0.072	1,00 and 3,00	0.816	1	71.000	0.369
2	TIRTRAT	0.996	1,00 and 3,00	5.602	2	70.000	0.006
3	PCFRAT3	1.063	1,00 and 3,00	3.929	3	69.000	0.012
At each step, the variable that maximizes the Mahalanobis distance between the two closest groups is entered.							
a. Maximum number of steps is 10.							
b. Maximum significance of F to enter is .05.							
c. Minimum significance of F to remove is .10.							
d. F level, tolerance, or VIN insufficient for further computation.							

Tableau XIII. Ratios retenus pour les trois groupes dans l'analyse discriminante linéaire.

### Classification Results a,c

Group			Predicted Group Membership			Total
			1,00	2,00	3,00	
Original	Count	1,00	14	2	9	25
		2,00	5	21	2	28
		3,00	5	2	14	21
	%	1,00	56.0	8.0	36.0	100.0
		2,00	17.9	75.0	7.1	100.0
		3,00	23.8	9.5	66.7	100.0
Cross-validated b	Count	1,00	14	2	9	25
		2,00	5	20	3	28
		3,00	6	2	13	21
	%	1,00	56.0	8.0	36.0	100.0
		2,00	17.9	71.4	10.7	100.0
		3,00	28.6	9.5	61.9	100.0
a. 66,2% of original grouped cases correctly classified.						
b. Cross validation is done only for those cases in the analysis. In cross validation, each case is classified by the functions derived from all cases other than that case.						
c. 63,5% of cross-validated grouped cases correctly classified.						

Tableau XIV. Résultats de la classification effectuée par l'analyse discriminante linéaire sur les ratios pour les trois groupes.

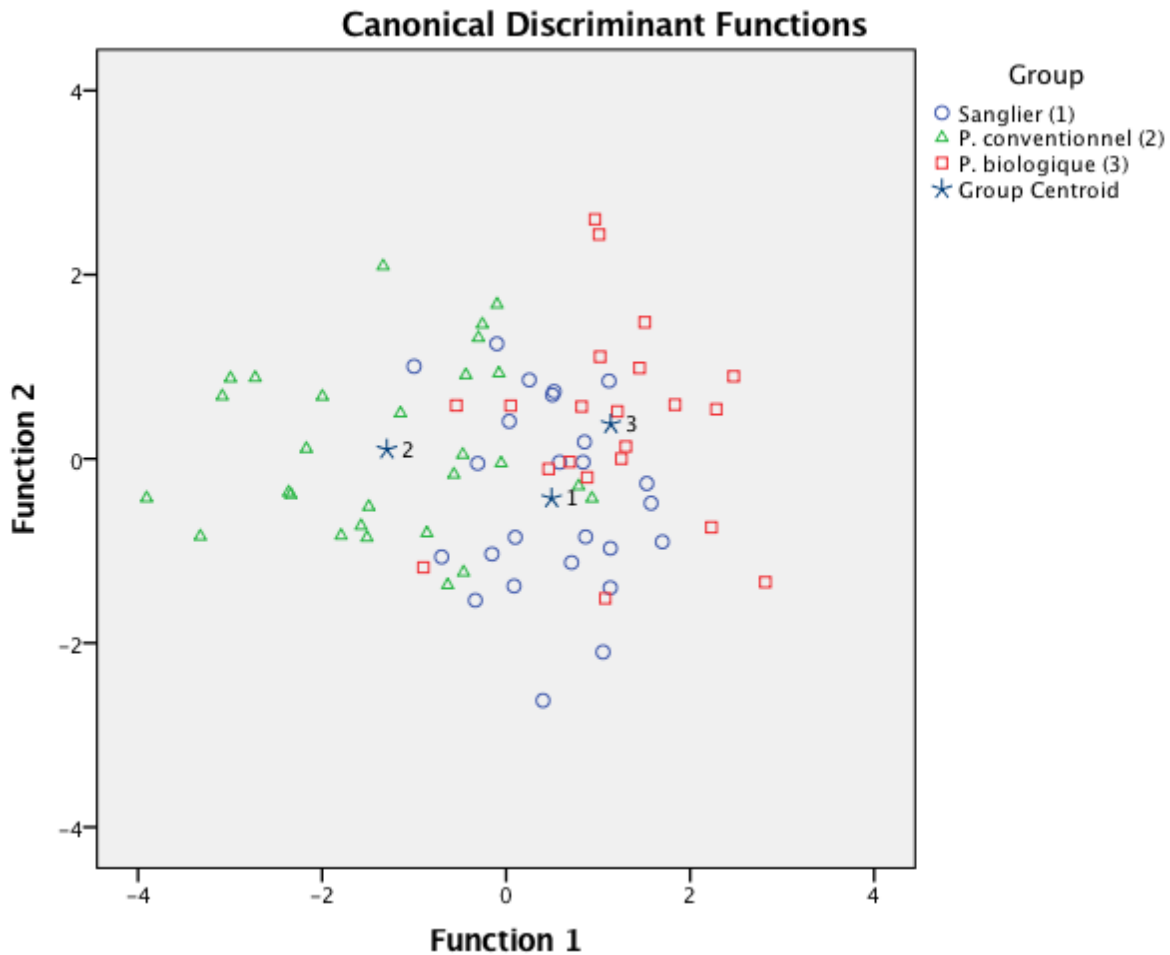


Figure 6. Nuages de points de l'analyse discriminante linéaire sur ratios à trois groupes

### 4.3 Comparaison aux méthodes de Bishop

#### 4.3.1 Méthodes par scores de Bishop

Bishop (1994) utilise les ratios sous la forme de scores afin de catégoriser l'ouverture de l'environnement, faisant ici référence à la densité de végétation. Par exemple, un environnement ouvert ferait référence à une savane alors qu'un environnement fermé se rapporte à une forêt dense.

Les scores identifiés par Bishop sont réutilisés et caractérisés ici.

PCFRAT décrit la forme de la surface articulaire post-calcaneaire. Plus la surface articulaire est carrée, plus le ratio se rapproche de 1, ce qui indique un habitat ouvert. De

même, une surface articulaire plus triangulaire se traduit en un ratio inférieur à 1 et est associée à un environnement fermé.

Les moyennes de valeur pour la variable PCFRAT pour les trois groupes sont, en ordre de groupes, 0.8524, 0.8257, et 0.8729. Selon ces résultats et celles de Bishop (1994), le porc conventionnel serait donc associé à un environnement relativement plus fermé que le sanglier et le porc biologique (v. fig. 7, p. 53).

PCFRAT 2 et 3 décrit la longueur de la surface articulaire post-calcanéaire. Plus celle-ci est allongée, plus les ratios sont bas et plus l'environnement est ouvert.

Toujours en ordre, les moyennes pour PCFRAT2 sont 0.6816, 0.7225, et 0.6819. Pour PCFRAT3 les moyennes sont 0.8020, 0.8768, et 0.7852. Dans les deux cas, le sanglier et le porc biologique ont une tendance vers l'allongement de la surface articulaire comparativement au porc conventionnel (v. fig. 8, p. 53 ; fig. 9, p. 54) indiquant un milieu relativement ouvert, selon Bishop.

TTRAT correspond au ratio entre la distance entre l'articulation tibiale et la tubérosité tibiale avec la longueur minimale de l'articulation tibiale. Les ratios plus bas indiquent un environnement ouvert.

Pour ce ratio les moyennes sont 1.1788, 1.0007, et 0.9733, ce qui indiquerait que le porc biologique et le porc conventionnel jouissent d'un environnement relativement plus ouvert, alors que le sanglier vit dans un environnement relativement plus fermé (v. fig. 10, p. 54). Ce ratio est donc en contradiction avec notre hypothèse.

TIRTRAT correspond au ratio entre les portions latérale et médiale de l'articulation tibiale de l'astragale (proximale). Les ratios plus près de 1 sont indicateurs d'un environnement ouvert.

Les moyennes sont ici 1.2248, 1.2171, et 1.3248, ce qui positionne le porc conventionnel comme ayant l'environnement relativement le plus ouvert des trois groupes, suivis de près par le sanglier, puis finalement le porc biologique (v. fig. 11, p. 54).



MLRAT correspond au ratio entre la largeur de l'articulation tibiale de l'astragale (proximale) et la largeur maximale de l'os. Les ratios plus bas indiquent un environnement ouvert.

Les moyennes sont 0.8592, 0.8989, et 0.8305, ce qui semble en concordance avec l'hypothèse de la mobilité partageant le signal de l'environnement ouvert (v. fig. 12, p. 54).

TATIMLR correspond au ratio entre la largeur de l'articulation tibiale de l'astragale (proximale) et l'articulation tarsienne (distale). Les ratios plus près de 1 indiquent un environnement ouvert.

Les moyennes sont 0.8856, 2.2171, et 2.3248, ce qui souligne une forte disparité entre les sangliers et les deux groupes de porcs (v. fig. 13, p. 54).

TITA1 et TITA2 sont respectivement les ratios latéral et médial entre la longueur de l'articulation tibiale et l'épaisseur de l'articulation tarsienne. Ces ratios doivent être utilisés ensemble puisque c'est une différence absolue nulle qui indique un environnement ouvert.

Les moyennes des TITA1 et TITA2 sont, en ordre de groupes, 1.2024 et 1.5984, 1.2404 et 1.5118, et 1.1886 et 1.6619. On identifie donc des différences de 0.396 pour le sanglier, 0.2714 pour le porc conventionnel, et 0.4733 pour le porc biologique, ce qui s'éloigne de l'hypothèse de travail (v. fig. 14, p. 54). Il faut toutefois noter que la distribution du porc biologique se rapproche plus de celle du sanglier que du porc conventionnel.

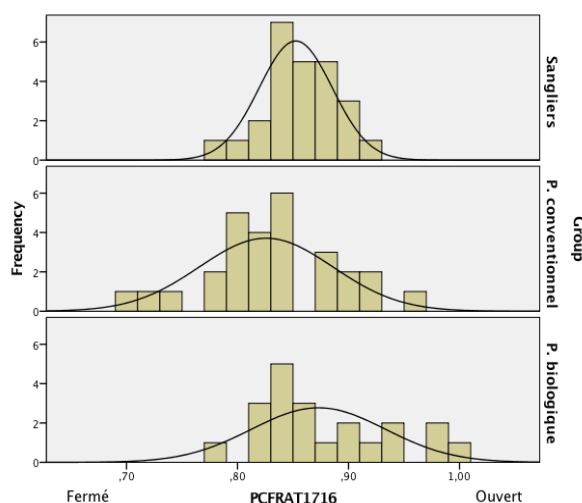


Figure 7. Histogrammes PCFRAT

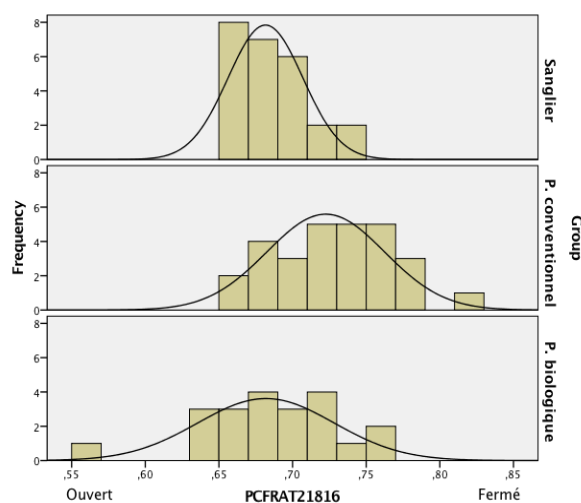


Figure 8. Histogrammes PCFRAT2

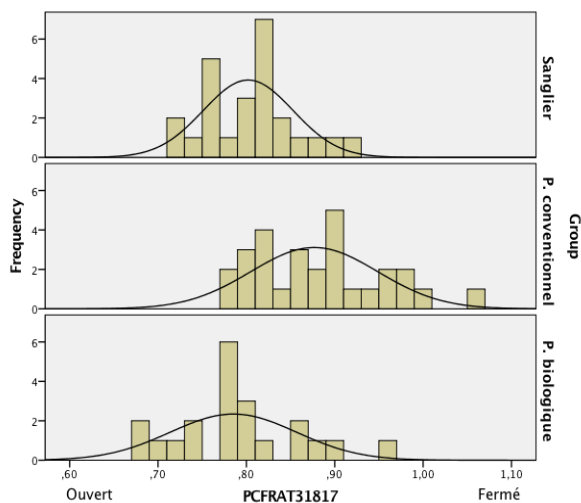


Figure 9. Histogrammes PCFRAT3

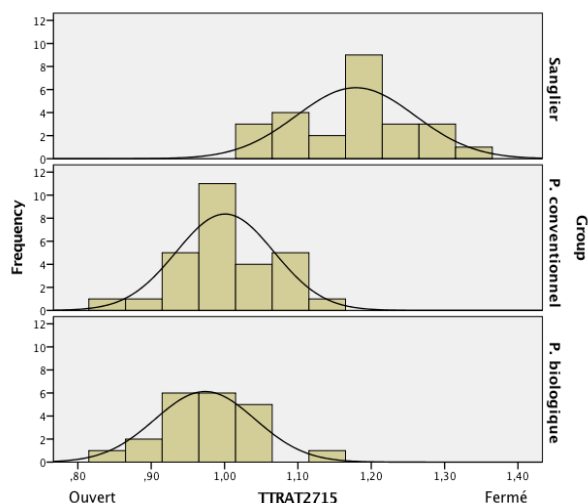


Figure 10. Histogrammes TTRAT

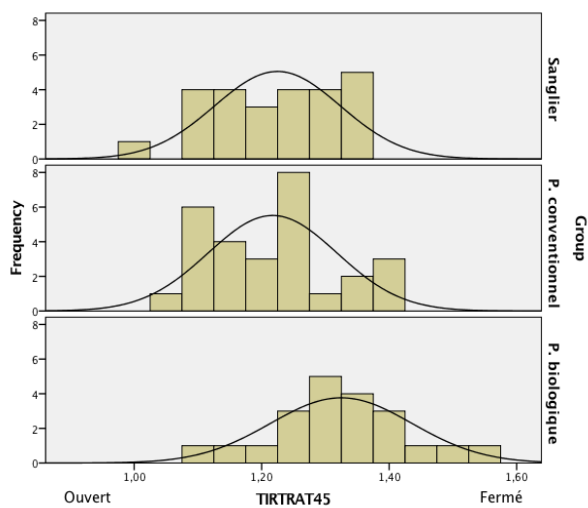


Figure 11. Histogrammes TIRTRAT

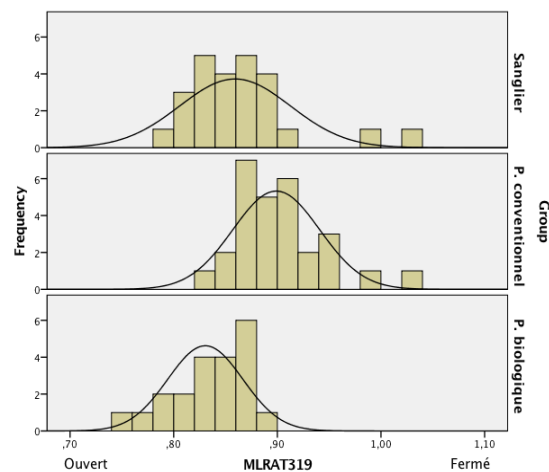


Figure 12. Histogrammes MLRAT

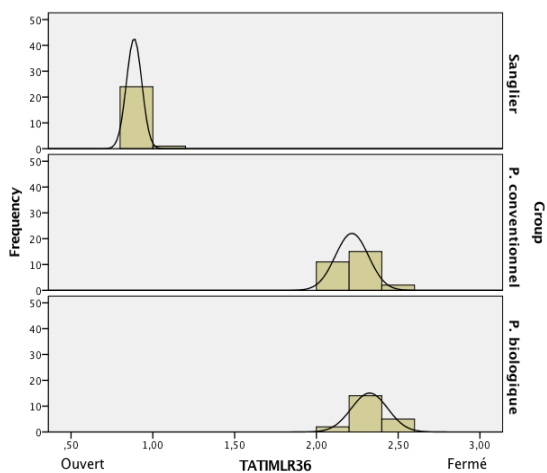


Figure 13. Histogrammes TATIMLR

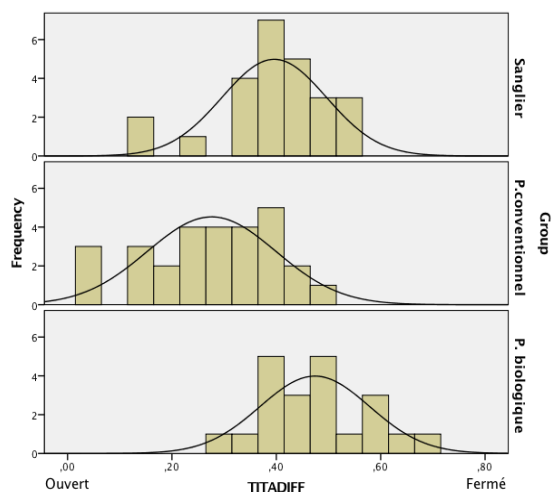


Figure 14. Histogrammes de la différence absolue entre TITA1 et TITA2

### 4.3.2 Analyses discriminantes linéaires basées sur les ratios identifiés par Bishop

#### 4.3.2.1 Normalité des distributions

Les ratios TATIMLR, MLRAT, et TITA2 sont retirés de l'analyse puisqu'ils ne suivent pas une distribution normale pour au moins un des groupes (v. annexe 4). Dans l'analyse à trois groupes, le ratio PCFRAT2 à  $p=0.068$  pour le sanglier est également retiré (v. annexe 4) afin de rendre le test du M de Box non significatif à  $p=0.133$  (v. tab. XVIII, p. 58).

#### 4.3.2.2 Analyse appliquée aux porcs

Lorsque l'analyse est lancée en excluant les ratios MLRAT et TIAT2 qui ne suivent pas une distribution normale (v. annexe 4), le test du M de Box est non significatif à  $p=0.298$  (v. tab. XV, ci-dessous).

Dans cette analyse, PCFRAT3 et TATIMLR sont les ratios retenus (v. tab. XVI, p. 56).

La classification (v. tab. XVII, p. 57) est à 71.4 % en classification observée et en validation croisée, et le TAU est de 41.67 %.

Test Results		
Box's M		3.866
F	Approx.	1.227
	df1	3
	df2	210803.783
	Sig.	0.298
Tests null hypothesis of equal population covariance matrices.		

Tableau XV. Test du M de Box sur les ratios identifiés par Bishop pour les porcs.

**Variables Entered/Removed a,b,c,d**

Step	Entered	Min. D Squared					
		Statistic	Between Groups	Exact F			
				Statistic	df1	df2	Sig.
1	PCFRAT3	1.629	2,00 and 3,00	19.554	1	47.000	5.755E-05
2	TATIMLR	2.579	2,00 and 3,00	15.145	2	46.000	8.845E-06
At each step, the variable that maximizes the Mahalanobis distance between the two closest groups is entered.							
a. Maximum number of steps is 14.							
b. Maximum significance of F to enter is .05.							
c. Minimum significance of F to remove is .10.							
d. F level, tolerance, or VIN insufficient for further computation.							

Tableau XVI. Ratios identifiés par Bishop retenus dans l'analyse discriminante linéaire pour les porcs.

### Classification Results a,c

Group			Predicted Group Membership		Total
			2,00	3,00	
Original	Count	2,00	18	10	28
		3,00	4	17	21
		Ungrouped cases	25	0	25
	%	2,00	64.3	35.7	100.0
		3,00	19.0	81.0	100.0
		Ungrouped cases	100.0	0.0	100.0
Cross-validated b	Count	2,00	18	10	28
		3,00	4	17	21
	%	2,00	64.3	35.7	100.0
		3,00	19.0	81.0	100.0
a. 71,4% of original grouped cases correctly classified.					
b. Cross validation is done only for those cases in the analysis. In cross validation, each case is classified by the functions derived from all cases other than that case.					
c. 71,4% of cross-validated grouped cases correctly classified.					

Tableau XVII. Résultats de la classification effectuée par l'analyse discriminante linéaire sur les ratios identifiés par Bishop pour les porcs.

#### 4.3.2.3 Analyse linéaire discriminante à trois groupes

Pour l'analyse de discrimination avec trois groupes (incluant le sanglier) le ratio PCFRAT est également retiré — au 5<sup>e</sup> pas — pour donc ne conserver que quatre ratios (v. tab. XIX, p. 58).

L'analyse discriminante avec trois groupes classe correctement 79.7 % des individus en classification observée et à 74.3 % en validation croisée (v. tab. XX, p. 59 ; v. fig. 15, p.60).

Le TAU pour cette analyse est de 69.39 %.

### Test Results

Box's M		29.539
F	Approx.	1.354
	df1	20
	df2	16098.076
	Sig.	0.133
Tests null hypothesis of equal population covariance matrices.		

Tableau XVIII. Test du M de Box sur les ratios identifiés par Bishop pour les trois groupes.

### Variables Entered/Removed a,b,c,d

Step	Entered	Removed	Min. D Squared					
			Statistic	Between Groups	Exact F			
					Statistic	df1	df2	Sig.
1	PCFRAT		0.151	1,00 and 3,00	1.722	1	71.000	0.194
2	TTRAT		0.879	2,00 and 3,00	5.198	2	70.000	0.008
3	TIRTRAT		2.189	2,00 and 3,00	8.509	3	69.000	6.932E-05
4	PCFRAT3		3.107	2,00 and 3,00	8.926	4	68.000	7.453E-06
5		PCFRAT	3.106	2,00 and 3,00	12.076	3	69.000	1.917E-06
6	TITA1		3.800	2,00 and 3,00	10.920	4	68.000	6.754E-07

At each step, the variable that maximizes the Mahalanobis distance between the two closest groups is entered.

a. Maximum number of steps is 10.

b. Maximum significance of F to enter is .05.

c. Minimum significance of F to remove is .10.

d. F level, tolerance, or VIN insufficient for further computation.

Tableau XIX. Ratios identifiés par Bishop retenus dans l'analyse discriminante linéaire appliquée aux trois groupes.

### Classification Results a,c

Group			Predicted Group Membership			Total
			1,00	2,00	3,00	
Original	Count	1,00	22	1	2	25
		2,00	2	19	7	28
		3,00	1	2	18	21
	%	1,00	88.0	4.0	8.0	100.0
		2,00	7.1	67.9	25.0	100.0
		3,00	4.8	9.5	85.7	100.0
Cross-validated b	Count	1,00	22	1	2	25
		2,00	2	17	9	28
		3,00	1	4	16	21
	%	1,00	88.0	4.0	8.0	100.0
		2,00	7.1	60.7	32.1	100.0
		3,00	4.8	19.0	76.2	100.0
a. 79,7% of original grouped cases correctly classified.						
b. Cross validation is done only for those cases in the analysis. In cross validation, each case is classified by the functions derived from all cases other than that case.						
c. 74,3% of cross-validated grouped cases correctly classified.						

Tableau XX. Résultats de la classification effectuée par l'analyse discriminante linéaire appliquée aux trois groupes sur les ratios identifiés par Bishop.

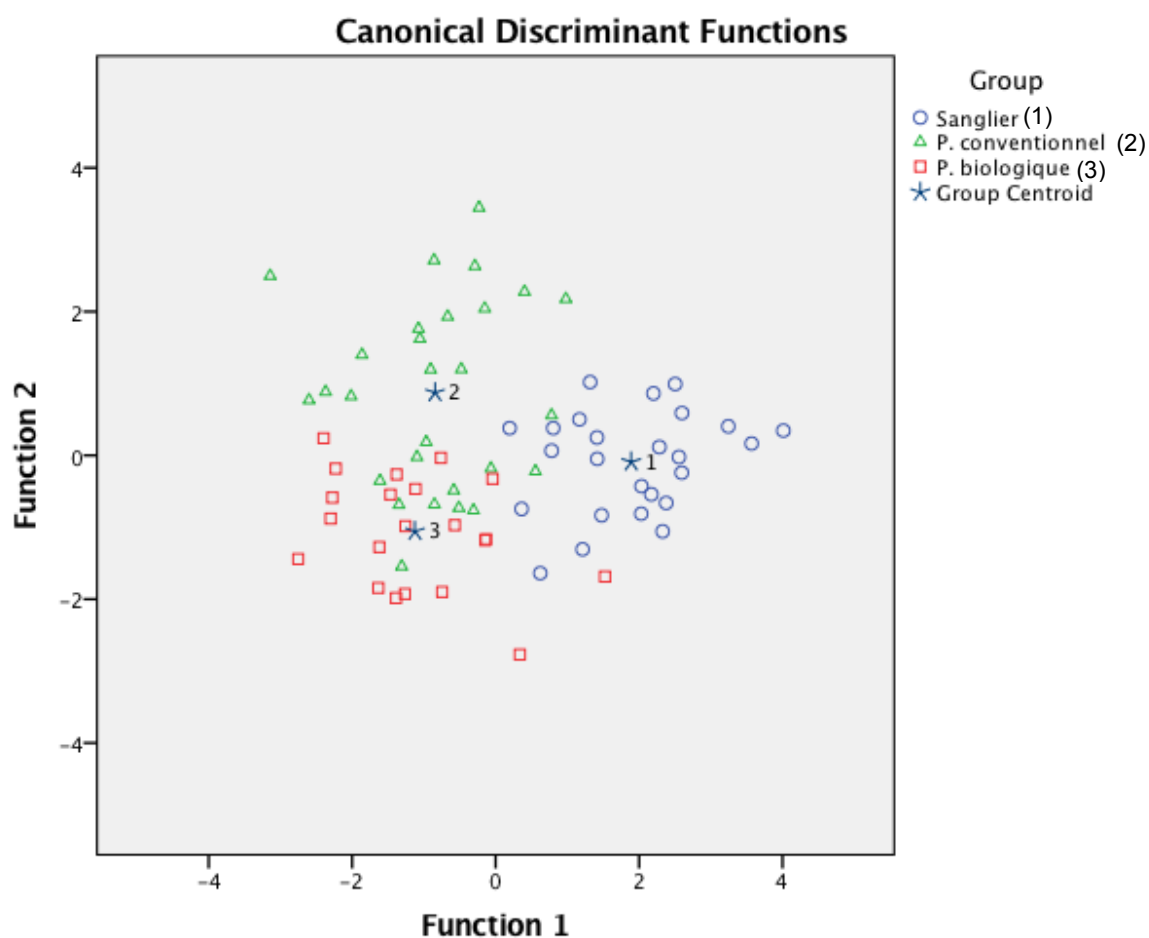


Figure 15. Nuages de points de l'analyse discriminante linéaire sur les ratios identifiés par Bishop, pour les trois populations à l'étude.



## Chapitre 5 — Discussion et Conclusion

Rappelons dans un premier temps les hypothèses testées dans cette recherche. Tout d’abord, nous cherchons à déterminer s’il est possible de déterminer le taux de mobilité d’un individu à partir de la morphologie de l’astragale et, dans le cas échéant, à partir de quelles variables cela est possible (v. section 5.1).

Enfin, nous sommes intéressés par le lien potentiel entre le taux de mobilité et l’ouverture de l’environnement. Le cas échéant, il serait possible de reconstruire le taux de mobilité et le contexte environnemental d’espèces de suidés fossiles (v. section 5.3).

### 5.1 Taux de mobilité et morphologie

Le tableau XXI (ci-dessous) synthétise les résultats vus au Chapitre 4.

Analyse discriminante	Classification Observée	TAU	Différence classification/TAU	Classification Validé-Croisé	Taux aléatoire
Linéaire deux groupes (4.1.1)	93.90%	87.50%	6.40%	93.90%	50.00%
Ratios deux groupes (4.1.2)	98.00%	91.67%	6.33%	95.90%	50.00%
Bishop deux groupes (4.3.2.2)	71.40%	41.67%	29.73%	71.40%	50.00%
Linéaire trois groupes (4.2.1)	89.20%	83.67%	5.53%	89.20%	33.33%
Ratios trois groupes (4.2.2)	66.20%	48.98%	17.22%	63.50%	33.33%
Bishop trois groupes (4.3.2.3)	79.70%	69.39%	10.31%	74.30%	33.33%

Tableau XXI. Résultats validés croisés et corrigés (TAU)

L’ensemble des analyses discriminantes linéaires fournit des résultats de classification corrigés (TAU) supérieurs aux taux de classification aléatoires, à l’exception de l’analyse à deux groupes effectuée sur les ratios identifiés par Bishop (1994) (v. section 4.3.2.2).

Les analyses basées sur les mesures linéaires (4.1.1 et 4.2.1) démontrent une stabilité dans leurs taux de classification corrigés avec des TAU de 87.50 % et 83.67 %. Cette constance et l'efficacité élevée font des analyses linéaires discriminantes sur mesures linéaires la méthode à privilégier dans la discrimination de nos groupes. Dans l'analyse 4.2.1, les sangliers sont classés correctement à 100 %, soit une séparation parfaite des deux groupes de porcs. Ces derniers présentent un recouvrement entre 14.3 et 17.9 % qui s'observe bien dans les nuages de points de la figure 10.

Les ratios (4.1.2 et 4.2.2) permettent une bonne séparation dans l'analyse à deux groupes avec un TAU à 91.67 %, mais un résultat beaucoup moins satisfaisant, à un TAU de 48.98 % lorsque les sangliers sont inclus.

Ces résultats démontrent que les analyses linéaires discriminantes effectuées permettent de discriminer entre les trois populations étudiées. De même, cette discrimination significative s'observe entre les deux groupes de porcs — Group 2 de porcs conventionnels, et Group 3 de porcs biologiques élevés à l'extérieur — (v. sections 4.1.1 et 4.1.2), ce qui supporte l'hypothèse voulant que le taux de mobilité puisse avoir une influence sur la morphologie de l'astragale chez les suidés.

## 5.2 Mobilité et couverture végétale

### 5.2.1 Méthode par scores

La méthode par scores de Bishop (1994), ainsi que les analyses linéaires discriminantes basées sur les ratios devraient nous permettre de discriminer entre les populations vivant dans différents contextes environnementaux. La recherche de Bishop (Op.Cit). démontra un lien entre la morphologie de l'astragale et l'ouverture de l'environnement ou couverture végétale et nous proposons que cette observation découle du taux de mobilité des individus. Le lien que nous cherchons à exposer serait la réponse morphologique commune qu'engendrent une mobilité élevée et un environnement ouvert, ou une mobilité réduite et un environnement fermé.

Les ratios retenus par Bishop (1994) sont PCFRAT, PCFRAT2, PCFRAT3, TTRAT, TIRTRAT, MLRAT, TATIMLR, et la différence absolue entre TITA1 et TITA2 (v. section 4.3.1 ; fig.7-14).

Les populations de porcs biologiques et les sangliers, qui ont un taux de mobilité supérieur au porc conventionnel, partagent le signal d'un habitat ouvert dans quatre cas sur huit selon les ratios proposés par Bishop (v. section 4.3). Ces quatre cas sont PCFRAT (v. fig. 7, p. 55), PCFRAT2 (v. fig. 8, p. 53), PCFRAT3 (v. fig. 9, p. 54), et MLRAT (v. fig. 12, p. 54).

Dans le cas de la différence absolue entre les ratios TITA1 et TITA2 (v. fig.14, p. 54), les sangliers et les porcs biologiques partagent le même signal, mais selon la méthode utilisée, ils signaleraient un environnement fermé.

Dans deux cas — TTRAT (v. fig. 10, p. 54) et TATIMLR (v. fig. 13, p. 54) —, un signal fort distingue les sangliers des deux groupes de porcs. Dans le cas de TTRAT, le sanglier présente un signal d'environnement fermé, comparativement aux deux groupes de porcs. Pour ce qui est de TATIMLR, le contraire est observé, en plus de présenter une variabilité moindre chez les trois groupes. Dans le cas de TATIMLR, la mesure 3 (v. fig. 2, p. 34 ; tab. I, p. 32) de la largeur de l'articulation tibiale est potentiellement liée à la masse de l'individu chez les mammifères (Martinez and Sudre 1995, Tsubamoto 2012), ce qui peut expliquer la forte distinction observée puisqu'en général les sangliers sont plus petits que les porcs dans notre échantillon. Le taux de mobilité ne justifie toutefois pas convenablement cette disparité, spécifiquement entre les porcs biologiques et les sangliers puisque ces deux ratios isolent le sanglier, mais leurs signaux d'ouverture de l'environnement sont contradictoires. Un facteur non identifié, possiblement issu de la variabilité interspécifique, pourrait expliquer ces différences.

Enfin, le ratio TIRTRAT (v. fig. 11, p. 54) ne permet pas de discriminer les populations, le sanglier se range cette fois avec le porc conventionnel.

Avec seulement 50 % des scores proposés par Bishop (1994) soutenant la corrélation entre le taux de mobilité et la forme de l'astragale, il apparaît que la méthode par scores ne constitue pas un outil efficace pour classifier les suidés en fonction de leur taux de mobilité.

### 5.2.2 Analyses discriminantes linéaires

En ce qui concerne les analyses discriminantes linéaires effectuées à partir de ratios identifiés par Bishop (1994), les résultats sont ambigus. Lors de l'analyse à trois groupes (4.3.2.3), le TAU atteint les 69.39 %, mais avec un recoupement important observable entre les deux groupes de porcs (avec 25 % du porc conventionnel classé avec le porc biologique v. tab. XXIII, p. 62). La mauvaise discrimination statistique des groupes est évidente dans les nuages de points de l'analyse 4.3.2.3 (v. fig. 15, p. 60).

Au niveau de l'analyse utilisant le sanglier comme groupe externe (4.3.2.2), le TAU est 41.67 % — contre le 50 % attendu par une classification aléatoire — ce qui ne constitue pas un taux de classification utilisable. De plus, dans cette analyse, il n'est pas possible de discriminer entre le porc et le sanglier.

## 5.3 Application en écomorphologie

Les résultats (4.1.1 et 4.1.2) démontrent la pertinence des analyses discriminantes linéaires pour classifier les suidés en fonction de leur taux de mobilité. Dans le cas de l'analyse sur mesures linéaires (4.1.1), les sangliers furent distribués à 96 % avec le porc biologique élevé à l'extérieur. Les ratios (4.1.2) partagent la même tangente, bien qu'avec une répartition des sangliers avec le porc biologique plus basse à 67.9 %.

Ces résultats démontrent l'efficacité de la méthode dans la classification d'individus externes au référentiel. En d'autres mots, il serait possible d'utiliser cette méthode pour identifier le taux de mobilité des suidés fossiles. Les applications possibles de cette méthode sont donc vastes. Il serait possible d'inférer sur les conditions d'élevage à travers le temps, ou même d'identifier des animaux mis en captivité. Les épisodes de domestication pourraient être identifiés à partir de signaux morphologiques subtils. Des perspectives pour les reconstitutions

paléoenvironnementales où les questions d'attrait de l'environnement ou de la pression prédatrice pourraient être également abordées.

L'efficacité de la méthode est aussi mise en valeur par l'accessibilité et la reproductibilité des analyses. La reproductibilité est assurée par le test de T par paires échantillonnés (v. section 3.3.1, tab. III, p. 33) et soutient la fiabilité de la prise de mesures linéaires au pied à coulisse. L'accessibilité de la méthode repose sur le nombre réduit de mesures nécessaires à l'analyse. Lorsque seules les mesures linéaires sont utilisées (4.1.1 et 4.2.1), uniquement cinq variables sont nécessaires, soit LATLEN (1), MEDLEN (2), TIRTMLT (3), TALAP (11), et PCFML (18) (v. section 3.2.1, tab. I, p.32). Le nombre de mesures nécessaires est de neuf lorsque les ratios sont utilisés, soit TIRTRAT (4/5), TARSRAT (7/8), TARAT (11/12), PCFRAT (17/16), et PCFRAT3 (18/17) (v. section 3.2.1, tab. II, p 33). Lorsque combinées, ces variables ne nécessitent la prise que de 12 mesures linéaires.

Il faut noter que les 12 mesures finalement retenues couvrent les trois principaux complexes articulaires de l'astragale et la forme générale de l'astragale. Les mesures 1 et 2 sont les longueurs des côtés latéral et médial ; les mesures 3, 4, et 5 se rapportent à l'articulation tibiale ; les mesures 7, 8, 11, et 12 concernent l'articulation tarsienne ; les mesures 16, 17, et 18 encadrent la facette articulaire calcanéaire postérieure (v. fig. 2, p. 24 ; tab. I, p.32).

Morphologiquement, les ratios retenus caractérisent l'astragale comme suit. Le ratios TIRTRAT (4/5) démontre que la portion médiale de l'articulation proximale (tibiale) est plus étroite que la portion latérale lorsque le taux de mobilité est élevé alors qu'un animal moins mobile aura une articulation plus symétrique.

Le ratio TARSRAT (7/8) suit le chemin inverse pour l'articulation distale (tarsale) où une articulation symétrique signale un individu plus mobile, alors qu'une portion médiale plus étroite est observée chez les individus moins mobiles.

TARAT (11/12) réfère aux profondeurs de l'articulation distale (tarsale). Les individus mobiles tendent à exhiber une portion latérale plus profonde que la portion médiale, alors que

les individus moins mobiles ont tendance à avoir des portions médiales et latérales plus semblables en profondeur.

PCFRAT (17/16) démontre que la limite proximale de la surface articulaire postérieure (calcanéaire) est plus droite par rapport à l'articulation proximale chez les individus mobiles. Les individus moins mobiles tendent à avoir une limite plus angulée où la limite médiale de la surface est plus courte que la limite latérale.

PCFRAT3 (18/17) indique l'allongement de la surface articulaire postérieure (calcanéaire). Une articulation allongée est signe de mobilité alors qu'une surface articulaire plus courte, voire « carrée » est observée pour les individus moins mobiles.

Les résultats des analyses discriminantes linéaires soutiennent qu'il serait possible d'appliquer ces ratios à un échantillon archéologique afin d'inférer sur le taux de mobilité des individus. Il faudrait toutefois explorer la méthode sur d'autres taxons de la famille des suidés afin d'en tester la latitude d'applicabilité puisque cette recherche n'eut accès qu'à des spécimens de *Sus scrofa* spp.

#### 5.4 Données 3D

Les données tridimensionnelles testées se sont avérées d'une utilité limitée. Les mesures elles-mêmes furent majoritairement rejetées à différents stades des analyses discriminantes linéaires et il en fut de même pour les ratios.

Plusieurs types de données métriques pourraient être tirées des modèles, que ce soit des mesures de surfaces (Harcourt-Smith et al. 2008), des indices de courbures, ou des données exploitables en morphométrie géométrique (Gould 2014) qui seraient complémentaires à l'approche par mesures linéaires. De même, plusieurs méthodes et outils sont utilisables dans la création de modèles tridimensionnels selon le type de données recherchées. L'utilisation de points de repère par *microscribe* (Terhune, Kimbel, and Lockwood 2007, Curran 2012, Owen et al. 2014, van Heteren et al. 2014) construit des modèles de surface simples, la numérisation au laser (Bernardini and Rushmeier 2002, Harcourt-Smith et al. 2008, Tocheri 2009, Gould 2014) crée un modèle complet des surfaces

visibles de l'objet, et les numérisations par CT scan et rayons x (Rho, Hobatho, and Ashman 1995, Jungers et al. 2002, Taddei et al. 2007, Piga et al. 2009, Mader et al. 2013, Parr et al. 2013, Dong et al. 2014, Stull et al. 2014) permettent d'explorer l'intérieur des éléments et les microstructures de manière non intrusive, même *in vivo*.

Une exploration plus approfondie des potentielles informations disponibles lors de l'exploitation d'un modèle numérique tridimensionnel constitue un sujet à part entière dans le domaine archéologique. Le principal avantage de l'utilisation de modèles numériques est lié à la conservation du matériel de référence physiquement fragile. De fait, il est possible de collecter l'ensemble des mesures linéaires présentées dans ce travail de manière totalement numérique. De même, le partage des données brutes — soit les objets numériques eux-mêmes — peut se faire de manière quasi instantanée.

Au final, bien que la numérisation et le traitement numérique des astragales n'aient pas fourni d'informations utiles dans l'immédiat pour cette recherche, l'archivage et le partage des données constituent un investissement pour de futurs chercheurs.

Les résultats de cette recherche confirment l'existence d'un lien statistiquement significatif entre la morphologie de l'astragale et le taux de mobilité de l'individu chez *Sus scrofa spp.*. Les variables nécessaires aux analyses discriminantes linéaires furent circonscrites à 12 mesures linéaires aisément reproduites afin d'effectuer à la fois les analyses sur mesures linéaires et sur ratios (v. section 5.3). Les analyses effectuées à partir des mesures linéaires constituent l'outil le plus simple et le plus efficace, ne nécessitant que cinq des 12 mesures linéaires et obtenant des classifications efficaces entre 83.67 et 87.50 %. Une telle méthode est donc aisément reproductible et n'entraîne pratiquement pas de coûts au niveau analytique.

Les méthodes et variables proposées par Bishop (1994) ont fourni des résultats ambigus par rapport à l'hypothèse de la présente recherche. Leur efficacité dans le cadre de reconstructions paléoenvironnementales est démontrée, mais dans le but de déterminer le taux de mobilité à l'aide de la morphologie de l'astragale, la méthode proposée dans cette recherche est préférable.

La numérisation au laser et l'utilisation de données tridimensionnelles furent une exploration méthodologique pour bâtir un corpus de données virtuelles. Les méthodes utilisées n'ont toutefois pas exploité les résultats de cette avenue. Des recherches plus poussées sur cette méthode novatrice et ses multiples avenues et applications pourraient sans l'ombre d'un doute venir enrichir davantage les études écomorphologiques.

L'inclusion d'un corpus archéologique et l'addition de populations sauvages au taux de mobilité connu au corpus de référence permettrait de créer un outil écomorphologique puissant en ce qui concerne les suidés, et le même exercice pourrait aisément être adapté à d'autres taxons.

Cette recherche aura permis d'affiner notre regard sur les analyses écomorphologiques existantes et futures. Le rappel et la démonstration du caractère multivarié du développement de signaux écomorphologiques souligne l'importance de potentielles révisions des méthodes écomorphologiques actuelles et la nécessité de dresser un portrait le plus fidèle possible de toutes les synergies d'un organisme.



# Bibliographie

2005. *Black's Veterinary Dictionary*. 21 ed. London: A & C Black.
- Averós, Xavier, Ludovic Brossard, Jean-Yves Dourmad, Karel H. de Greef, Helen L. Edge, Sandra A. Edwards, and Marie-Christine Meunier-Salaün. 2010. "A meta-analysis of the combined effect of housing and environmental enrichment characteristics on the behaviour and performance of pigs." *Applied Animal Behaviour Science* 127:73-85. doi: 10.1016/j.applanim.2010.09.010.
- Banks-Sills, L., P. Stahle, I. Svensson, and N. Eliaz. 2011. "Strain driven transport for bone modeling at the periosteal surface." *Math Biosci* 230 (1):37-44. doi: 10.1016/j.mbs.2010.12.008.
- Bar-Oz, Guy, Tamar Dayan, Daniel Kaufman, and Mina Weinstein-Evron. 2003. "The Natufian economy at el-Wad Terrace with special reference to gazelle exploitation patterns." *Journal of Archaeological Science* 31:217-231. doi: 10.1016/S0305-4403(03)00116-X.
- Bartlett, J. W., and C. Frost. 2008. "Reliability, repeatability and reproducibility: analysis of measurement errors in continuous variables." *Ultrasound Obstet Gynecol* 31 (4): 466-75. doi: 10.1002/uog.5256.
- Behrensmeyer, Anna K., and Kaye E. Reed. 2013. "Reconstructing the Habitats of Australopithecus: Paleoenvironments, Site Taphonomy, and Faunas." In *Vertebrate Paleobiology and Paleoanthropology*, 41-60. Springer Science+Business Media.
- Bernardini, Fausto, and Holly Rushmeier. 2002. "The 3D Model Acquisition Pipeline." *Computer Graphics forum* 21 (2):149-172.
- Bertram, John E. A., and S. M. Swartz. 1991. "The 'Law of Bone Transformation' : A Case of Crying Wolff?" *Biol. Rev.* 66:245-273.
- Bishop, Laura C., Tania King, Andrew Hill, and Bernard Wood. 2006. "Palaeoecology of *Kolpochoerus heseloni* (= *K. limnetes*): a multiproxy approach." *Transactions of the Royal Society of South Africa* 61 (2):81-88. doi: 10.1080/00359190609519956.
- Bishop, Laura Corvinelli. 1994. "Pigs and the ancestors: Hominids, suids and environments during the Plio-Pleistocene of East Africa." Yale University.
- Bobé, R., A. K. Behrensmeyer, and R. E. Chapman. 2002. "Faunal change, environmental variability and late Pliocene hominin evolution." *J Hum Evol* 42 (4):475-97. doi: 10.1006/jhev.2001.0535.
- Bock, Walter J. 1989. "From Biologische Anatomie to Ecomorphology." 3rd International Congress of Vertebrate Morphology, Netherlands Journal of Zoology.
- Bock, Walter J. 1994. "Concepts and methods in ecomorphology." *Journal of Biosciences* 19 (4):403-413. doi: 10.1007/bf02703177.
- Bock, Walter J., and Gerd von Wahlert. 1965. "Adaptation and the Form-Function Complex." *Evolution* 19 (3):269. doi: 10.2307/2406439.

- Boissy, Alain, and Hans W. Erhard. 2014. "How Studying Interactions Between Animal Emotions, Cognition, and Personality Can Contribute to Improve Farm Animal Welfare." In *Genetics and the Behavior of Domestic Animals*, 81-113.
- Bolhuis, Jantina Elizabeth, Willem G. P. Schouten, Johan W. Schrama, and Victor M. Wiegant. 2006. "Effects of rearing and housing environment on behaviour and performance of pigs with different coping characteristics." *Applied Animal Behaviour Science* 101 (1-2):68-85. doi: 10.1016/j.applanim.2006.01.001.
- Boumans, Iris J. M. M., Eddie A. M. Bokkers, Gert Jan Hofstede, and Imke J. M. de Boer. 2015. "Understanding feeding patterns in growing pigs by modelling growth and motivation." *Applied Animal Behaviour Science* 171:69-80. doi: 10.1016/j.applanim.2015.08.013.
- Boyde, Alan. 2003. "The real response of bone to exercise." *Journal of Anatomy* 203:173-189.
- Crompton, R. H., W. I. Sellers, and S. K. Thorpe. 2010. "Arboreality, terrestriality and bipedalism." *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 365 (1556):3301-14. doi: 10.1098/rstb.2010.0035.
- Crompton, R. H., E. E. Vereecke, and S. K. Thorpe. 2008. "Locomotion and posture from the common hominoid ancestor to fully modern hominins, with special reference to the last common panin/hominin ancestor." *J Anat* 212 (4):501-43. doi: 10.1111/j.1469-7580.2008.00870.x.
- Curran, Sabrina C. 2009. "Hominin Paleoecology and Cervid Ecomorphology." Doctor of Philosophy, University of Minnesota.
- Curran, Sabrina C. 2012. "Expanding ecomorphological methods: geometric morphometric analysis of Cervidae post-crania." *Journal of Archaeological Science* 39 (4): 1172-1182. doi: 10.1016/j.jas.2011.12.028.
- Currey, John D. 2002. *Bones : structure and mechanics*. 2nd ed. Princeton: Princeton University Press.
- Currey, John D. 2011. "The structure and mechanics of bone." *Journal of Materials Science* 47 (1):41-54. doi: 10.1007/s10853-011-5914-9.
- Davis, Simon J. M. 2000. "The Effect of Castration and Age on the Development of the Shetland Sheep Skeleton and a Metric Comparison Between Bones of Males, Females and Castrates." *Journal of Archaeological Science* 27 (5):373-390. doi: 10.1006/jasc.1999.0452.
- Dayan, Tamar. 1994. "Early Domesticated Dog of the Near East." *Journal of Archaeological Science* 21:633-640.
- Dayan, Tamar, and Daniel Simberloff. 1995. "Natufian Gazelles: Proto-Domestication Reconsidered." *Journal of Archaeological Science* 22:671-675.
- DeGusta, David, and Elisabeth Vrba. 2003. "A method for inferring paleohabitats from the functional morphology of bovid astragali." *Journal of Archaeological Science* 30 (8): 1009-1022. doi: 10.1016/s0305-4403(02)00286-8.
- DeGusta, David, and Elisabeth Vrba. 2005a. "Methods for inferring paleohabitats from discrete traits of the bovid postcranial skeleton." *Journal of Archaeological Science* 32 (7):1115-1123. doi: 10.1016/j.jas.2005.02.011.

- DeGusta, David, and Elisabeth Vrba. 2005b. "Methods for inferring paleohabitats from the functional morphology of bovid phalanges." *Journal of Archaeological Science* 32 (7): 1099-1113. doi: 10.1016/j.jas.2005.02.010.
- Dong, P., S. Hauptert, B. Hesse, M. Langer, P. J. Gouttenoire, V. Bousson, and F. Peyrin. 2014. "3D osteocyte lacunar morphometric properties and distributions in human femoral cortical bone using synchrotron radiation micro-CT images." *Bone* 60:172-85. doi: 10.1016/j.bone.2013.12.008.
- Drapeau, M. S., R. Bobe, J. G. Wynn, C. J. Campisano, L. Dumouchel, and D. Geraads. 2014. "The Omo Mursi Formation: a window into the East African Pliocene." *J Hum Evol* 75:64-79. doi: 10.1016/j.jhevol.2014.07.001.
- Emerson, Sharon B., Harry W. Greene, and Eric L. Charnov. 1994. "Allometric Aspects of Predator-Prey Interactions." In *Ecological Morphology : Integrative Organismal Biology*, edited by Peter Cam Wainwright and Stephen M. Reilly, 123-139. Chicago and London: The University Press of Chicago.
- Evin, Allowen, Thomas Cucchi, Andrea Cardini, Una Strand Vidarsdottir, Greger Larson, and Keith Dobney. 2013. "The long and winding road: identifying pig domestication through molar size and shape." *Journal of Archaeological Science* 40 (1):735-743. doi: 10.1016/j.jas.2012.08.005.
- Faith, J. Tyler, Richard Potts, Thomas W. Plummer, Laura C. Bishop, Curtis W. Marean, and Christian A. Tryon. 2012. "New perspectives on middle Pleistocene change in the large mammal faunas of East Africa: *Damaliscus hypsodon* sp. nov. (Mammalia, Artiodactyla) from Lainyamok, Kenya." *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 361-362:84-93. doi: 10.1016/j.palaeo.2012.08.005.
- Frost, Harold M. 1987. "Bone "Mass" and the "Mechanostat": A Proposal." *The Anatomical Record* 219 (1):1-9.
- Frost, Harold M. 1990a. "Skeletal Structural Adaptations to Mechanical Usage (SATMU): 1. Redefining Wolff's Law: The Bone Modeling Problem." *The Anatomical Record* 226 (4):403-413. doi: 10.1002/ar.1092260402.
- Frost, Harold M. 1990b. "Skeletal Structural Adaptations to Mechanical Usage (SATMU): 2. Redefining Wolff's Law: The Remodeling Problem." *The Anatomical Record* 226 (4): 414-422. doi: 10.1002/ar.1092260403.
- Frost, Harold M. 1990c. "Skeletal Structural Adaptations to Mechanical Usage (SATMU): 3. The Hyaline Cartilage Modeling Problem." *The Anatomical Record* 226:423-432.
- Frost, Harold M. 1994. "Wolf's Law and Bone Adaptation." *The Angle Orthodontist* 64 (3): 175-188.
- Ginot, S., L. Hautier, L. Marivaux, and M. Vianey-Liaud. 2016. "Ecomorphological analysis of the astragalo-calcaneal complex in rodents and inferences of locomotor behaviours in extinct rodent species." *PeerJ* 4:e2393. doi: 10.7717/peerj.2393.
- Gould, F. D. 2014. "To 3D or not to 3D, that is the question: do 3D surface analyses improve the ecomorphological power of the distal femur in placental mammals?" *PLoS One* 9 (3):e91719. doi: 10.1371/journal.pone.0091719.

- Grandin, Temple, and Mark J. Deesing. 2014. "Genetics and Behavior During Handling, Restraint, and Herding." In *Genetics and the Behavior of Domestic Animals*, 115-158.
- Gustafsson, Maria, Per Jensen, Francien H. de Jonge, Gudrun Illmann, and Marek Spinka. 1999. "Maternal behaviour of domestic sows and crosses between domestic sows and wild boar." *Applied Animal Behaviour Science* 65:29-42.
- Gustafsson, Maria, Per Jensen, Francien H. de Jonge, and Teun Schuurman. 1999. "Domestication effects on foraging strategies in pigs (*Sus scrofa*)." *Applied Animal Behaviour Science* 62:305-317.
- Haber, Annat, Tamar Dayan, and Nimrod Getz. 2005. "Pig exploitation at Hagoshrim; a prehistoric site in the Southern Levant." In *First Steps of Animal Domestication: New archaeozoological approaches*, edited by J. D. Vigne, J Peters and D Helmer, 80-85. Oxford: Oxbow Books.
- Hall, Brian K. 2005. *Bones and Cartilage Developmental and Evolutionary Skeletal Biology*: Elsevier Academic Press.
- Harcourt-Smith, William E. H., Melissa Tallman, Stephen R. Frost, David F. Wiley, F. James Rohlf, and Eric Delson. 2008. "Analysis of Selected Hominoid Joint Surfaces Using Laser Scanning and Geometric Morphometrics: A Preliminary Report." In *Mammalian Evolutionary Morphology: A Tribute to Frederic S. Szalay*, edited by Eric J. Sargis and M. Dagosto, 373-383. Springer Science + Business Media.
- Jensen, Margit Bak, Mette S. Herskin, Björn Forkman, and Lene Juul Pedersen. 2015. "Effect of increasing amounts of straw on pigs explorative behaviour." *Applied Animal Behaviour Science* 171:58-63. doi: 0.1016/j.applanim.2015.08.035.
- Jensen, Per. 2006. "Domestication—From behaviour to genes and back again." *Applied Animal Behaviour Science* 97 (1):3-15. doi: 10.1016/j.applanim.2005.11.015.
- Johnson, K. A., P. Muir, R. G. Nicoll, and J. K. Roush. 2000. "Asymmetric Adaptive Modeling of Central Tarsal Bones in Racing Greyhounds." *Bone* 27 (2):257-263.
- Judex, S., Ted S. Gross, Robert C. Bray, and Ronald F. Zernicke. 1997. "Adaptation of bone to physiological stimuli." *Journal of Biomechanics* 30 (5):421-429.
- Judex, Stefan, William C. Whiting, and Ronald F. Zernicke. 1999. "Exercise-induced bone adaptation- considerations for designing an osteogenically elective exercise program." *International Journal of Industrial Ergonomics* 24:235-238.
- Jungers, William L., Laurie R Godfreu, Elwyn L. Simons, Roshna E. Wunderlich, B. G. Richmond, and Prithijit S. Chatrath. 2002. "Ecomorphology and Behavior of Giant Extinct Lemurs from Madagascar." In, 371-411.
- Kappelman, John. 1988. "Morphology and Locomotor Adaptations of the Bovid Femur in Relation to Habitat." *Journal of Morphology* 198 (1):119-130. doi: 10.1002/jmor.1051980111.
- Kaptoge, S., J. A. da Silva, K. Brixen, D. M. Reid, H. Kroger, T. L. Nielsen, M. Andersen, C. Hagen, R. Lorenc, S. Boonen, M. C. de Vernejoul, J. J. Stepan, J. Adams, J. M. Kaufman, and J. Reeve. 2008. "Geographical variation in DXA bone mineral density in young European men and women. Results from the Network in Europe on Male Osteoporosis (NEMO) study." *Bone* 43 (2):332-9. doi: 10.1016/j.bone.2008.04.001.

- Klein, R. G., G. Avery, K. Cruz-Urbe, and T. E. Steele. 2007. "The mammalian fauna associated with an archaic hominin skullcap and later Acheulean artifacts at Elandsfontein, Western Cape Province, South Africa." *J Hum Evol* 52 (2):164-86. doi: 10.1016/j.jhevol.2006.08.006.
- Kovarovic, K., and P. Andrews. 2007. "Bovid postcranial ecomorphological survey of the Laetoli paleoenvironment." *J Hum Evol* 52 (6):663-80. doi: 10.1016/j.jhevol.2007.01.001.
- Kovarovic, Kris, Leslie C. Aiello, Andrea Cardini, and Charles A. Lockwood. 2011. "Discriminant function analyses in archaeology: are classification rates too good to be true?" *Journal of Archaeological Science* 38 (11):3006-3018. doi: 10.1016/j.jas.2011.06.028.
- Mader, K. S., P. Schneider, R. Muller, and M. Stampanoni. 2013. "A quantitative framework for the 3D characterization of the osteocyte lacunar system." *Bone* 57 (1):142-54. doi: 10.1016/j.bone.2013.06.026.
- Madrell, Simon, Pieter Dullemeijer, Andrew A. Biewener, Daniel E. Lieberman, and Alfred W. Crompton. 1998. "Bone design and biomechanics." In *Principles of Animal Design : The Optimization and Symmorphosis Debate*, edited by Ewald R. Weibel, C. Richard Taylor and Liana Bolis, 63-86. Cambridge: Cambridge University Press.
- Martinez, Jean-Noël, and Jean Sudre. 1995. "The astragalus of Paleogene artiodactyls: comparative morphology, variability and prediction of body mass." *Lethaia* 28:197-209.
- Meloro, Carlo, Sarah Elton, Julien Louys, Laura C. Bishop, and Peter Ditchfield. 2013. "Cats in the forest: predicting habitat adaptations from humerus morphometry in extant and fossil Felidae (Carnivora)." *Paleobiology* 39 (3):323-344. doi: 10.1666/12001.
- Owen, Joseph, Keith Dobney, Allowen Evin, Thomas Cucchi, Greger Larson, and Una Strand Vidarsdottir. 2014. "The zooarchaeological application of quantifying cranial shape differences in wild boar and domestic pigs (*Sus scrofa*) using 3D geometric morphometrics." *Journal of Archaeological Science* 43:159-167. doi: 10.1016/j.jas.2013.12.010.
- Ozcivici, E., and S. Judex. 2014. "Trabecular bone recovers from mechanical unloading primarily by restoring its mechanical function rather than its morphology." *Bone* 67:122-9. doi: 10.1016/j.bone.2014.05.009.
- Palmqvist, Paul, Juan A. Pérez-Claros, Christine M. Janis, and Darren R. Gröcke. 2008. "Tracing the ecophysiology of ungulates and predator-prey relationships in an early Pleistocene large mammal community." *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 266 (1-2):95-111. doi: 10.1016/j.palaeo.2008.03.015.
- Parr, W. C., U. Chamoli, A. Jones, W. R. Walsh, and S. Wroe. 2013. "Finite element micro-modelling of a human ankle bone reveals the importance of the trabecular network to mechanical performance: new methods for the generation and comparison of 3D models." *J Biomech* 46 (1):200-5. doi: 10.1016/j.jbiomech.2012.11.011.
- Pedersen, Lene J., Mette S. Herskin, Björn Forkman, Ulrich Halekoh, Kristian M. Kristensen, and Margit B. Jensen. 2014. "How much is enough? The amount of straw necessary to

- satisfy pigs' need to perform exploratory behaviour." *Applied Animal Behaviour Science* 160:46-55. doi: 10.1016/j.applanim.2014.08.008.
- Petherick, J. Carol. 2007. "Spatial requirements of animals: Allometry and beyond." *Journal of Veterinary Behavior: Clinical Applications and Research* 2 (6):197-204. doi: 10.1016/j.jveb.2007.10.001.
- Piasentier, E., E. Saccà, and S. Bovolenta. 2007. "Dietary selection and ingestive behaviour of fallow deer and sheep grazing on adjacent monocultures of white clover and tall fescue." *Small Ruminant Research* 71 (1-3):222-233. doi: 10.1016/j.smallrumres.2006.07.005.
- Piga, Giampaolo, Andrés Santos-Cubedo, Salvador Moya Solà, Antonio Brunetti, Assumpció Malgosa, and Stefano Enzo. 2009. "An X-ray Diffraction (XRD) and X-ray Fluorescence (XRF) investigation in human and animal fossil bones from Holocene to Middle Triassic." *Journal of Archaeological Science* 36 (9):1857-1868. doi: 10.1016/j.jas.2009.04.013.
- Platzer, Werner. 2005. *Atlas de poche d'anatomie*. 4e édition ed. 3 vols. Vol. 1. Appareil locomoteur: Médecine-Science Flammarion.
- Plummer, Thomas W., and Laura C. Bishop. 1994. "Hominid paleoecology at Olduvai Gorge, Tanzania as indicated by antelope remains." *Journal of Human Evolution* 27:47-75.
- Plummer, Thomas W., Laura C. Bishop, and Fritz Hertel. 2008. "Habitat preference of extant African bovids based on astragalus morphology: operationalizing ecomorphology for palaeoenvironmental reconstruction." *Journal of Archaeological Science* 35 (11): 3016-3027. doi: 10.1016/j.jas.2008.06.015.
- Popkin, Peter R. W., Polydora Baker, Fay Worley, Sebastian Payne, and Andy Hammon. 2012. "The Sheep Project (1): determining skeletal growth, timing of epiphyseal fusion and morphometric variation in unimproved Shetland sheep of known age, sex, castration status and nutrition." *Journal of Archaeological Science* 39 (6):1775-1792. doi: 10.1016/j.jas.2012.01.018.
- Prevosti, Francisco J., and Fabiana M. Martin. 2013. "Paleoecology of the mammalian predator guild of Southern Patagonia during the latest Pleistocene: Ecomorphology, stable isotopes, and taphonomy." *Quaternary International* 305:74-84. doi: 10.1016/j.quaint.2012.12.039.
- Price, Edward O. 1999. "Behavioral development in animals undergoing domestication." *Applied Animal Behaviour Science* 65:245-271.
- Rabey, K. N., D. J. Green, A. B. Taylor, D. R. Begun, B. G. Richmond, and S. C. McFarlin. 2015. "Locomotor activity influences muscle architecture and bone growth but not muscle attachment site morphology." *J Hum Evol* 78:91-102. doi: 10.1016/j.jhevol.2014.10.010.
- Redding, Richard W. 2005. "Breaking the mold: A consideration of variation in the evolution of animal domestication." In *First Steps of Animal Domestication: New archaeozoological approaches*, edited by J. D. Vigne, J Peters and D Helmer, 41-49. Oxford: Oxbow Books.

- Reed, Kaye E., Lillian M. Spencer, and Amy L. Rector. 2013. "Faunal Approaches in Early Hominin Paleoecology." In *Early Hominin Paleoecology*, edited by Matthew Sponheimer, Julia A. Lee Thorp, Kaye E. Reed and Peter S. Ungar, 3-34. Colorado: University Press of Colorado.
- Rho, Jae-Young, M.C. Hobatho, and R.B. Ashman. 1995. "Relations of mechanical properties to density and CT numbers in human bone." *Med Eng Phys* 17 (5):347-355.
- Richmond, B. G., D. R. Begun, and D. S. Strait. 2001. "Origin of human bipedalism: The knuckle-walking hypothesis revisited." *Am J Phys Anthropol* Suppl 33:70-105.
- Rozzi, R., and M. R. Palombo. 2013. "Do methods for predicting paleohabitats apply for mountain and insular fossil bovids?" *Integr Zool* 8 (3):244-59. doi: 10.1111/j.1749-4877.2012.00325.x.
- Sabharwal, S., C. Wenokor, A. Mehta, and C. Zhao. 2012. "Intra-articular morphology of the knee joint in children with Blount disease: a case-control study using MRI." *J Bone Joint Surg Am* 94 (10):883-90. doi: 10.2106/JBJS.K.00956.
- Stull, K. E., M. L. Tise, Z. Ali, and D. R. Fowler. 2014. "Accuracy and reliability of measurements obtained from computed tomography 3D volume rendered images." *Forensic Sci Int* 238:133-40. doi: 10.1016/j.forsciint.2014.03.005.
- Su, D. F., and T. Harrison. 2008. "Ecological implications of the relative rarity of fossil hominins at Laetoli." *J Hum Evol* 55 (4):672-81. doi: 10.1016/j.jhevol.2008.07.003.
- Su, Denise F., and Terry Harrison. 2014. "The paleoecology of the Upper Laetoli Beds, Laetoli Tanzania: A review and synthesis." *Journal of African Earth Sciences* 101:405-419. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2014.09.019.
- Taddei, F., E. Schileo, B. Helgason, L. Cristofolini, and M. Viceconti. 2007. "The material mapping strategy influences the accuracy of CT-based finite element models of bones: an evaluation against experimental measurements." *Med Eng Phys* 29 (9):973-9. doi: 10.1016/j.medengphy.2006.10.014.
- Taxonomicon. 2004-2016. "Taxon : Species *Sus scrofa*." Last Modified 2016/04/30, accessed 2017/01/05. <http://taxonomicon.taxonomy.nl/TaxonTree.aspx?id=67678&src=0>.
- Telkänranta, Helena, Marc B. M. Bracke, and Anna Valros. 2014. "Fresh wood reduces tail and ear biting and increases exploratory behaviour in finishing pigs." *Applied Animal Behaviour Science* 161:51-59. doi: 10.1016/j.applanim.2014.09.007.
- Terhune, C. E., W. H. Kimbel, and C. A. Lockwood. 2007. "Variation and diversity in *Homo erectus*: a 3D geometric morphometric analysis of the temporal bone." *J Hum Evol* 53 (1):41-60. doi: 10.1016/j.jhevol.2007.01.006.
- Tocheri, Matthew W. 2009. "Laser Scanning: 3D Analysis of Biological Surfaces." In *Advanced Imaging in Biology and Medicine*, edited by C.W. Sensen and B. Hallgrímsson. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Tsubamoto, Takehisa. 2012. "Estimating body mass from the astragalus in mammals." *Acta Palaeontologica Polonica*. doi: 10.4202/app.2011.0067.
- van Heteren, Anneke H., Ann MacLarnon, Christophe Soligo, and Todd C. Rae. 2014. "Functional morphology of the cave bear (*Ursus spelaeus*) cranium: a three-

- dimensional geometric morphometric analysis." *Quaternary International* 339-340:209-216. doi: 10.1016/j.quaint.2013.10.056.
- Virgós, Emilio. 2002. "Factors affecting wild boar (*Sus scrofa*) occurrence in highly fragmented Mediterranean landscapes." *Canadian Journal of Zoology* 80 (3):430-435. doi: 10.1139/z02-028.
- von Den Driesch, Angela. 1976. *A guide to the measurement of animal bones from archaeological sites*. Vol. 1, *Peabody Museum Bulletins*. Harvard University: Peabody Museum of Archaeology and Ethnology. Reprint, 8th.
- Wainwright, Peter Cam, and Stephen M. Reilly. 1994. *Ecological Morphology : Integrative Organismal Biology*. Edited by Peter Cam Wainwright and Stephen M. Reilly. Chicago and London: The University Press of Chicago.
- Weinand, Daniel C. 2007. "A study of parametric versus non-parametric methods for predicting paleohabitat from Southeast Asian Bovid astragali." *Journal of Archaeological Science* 34 (11):1774-1783. doi: 10.1016/j.jas.2006.12.016.
- Weinans, H., M. Siebelt, R. Agricola, S. M. Botter, T. M. Piscoer, and J. H. Waarsing. 2012. "Pathophysiology of peri-articular bone changes in osteoarthritis." *Bone* 51 (2):190-6. doi: 10.1016/j.bone.2012.02.002.
- Werdelin, Lars. 2008. "Biogeographic relationships of African carnivore faunas, 7–1.2Ma." *Comptes Rendus Palevol* 7 (8):645-656. doi: 10.1016/j.crpv.2008.09.014.
- Werdelin, Lars, and Fredrick Kyalo Manthi. 2012. "Carnivora from the Kanapoi hominin site, northern Kenya." *Journal of African Earth Sciences* 64:1-8. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2011.11.003.
- Wertz, X., D. Schoevaert, H. Maitournam, P. Chassignet, and L. Schwartz. 2006. "The effect of hormones on bone growth is mediated through mechanical stress." *C R Biol* 329 (2):79-85. doi: 10.1016/j.crv.2005.10.005.
- Wojnar, Ryszard. 2010. "Bone and Cartilage - its Structure and Physical Properties." In *Biomechanics of Hard Tissues*, edited by Andreas Öchsner and Waqar Ahmed, 1-75. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Wolff, Julius. 1892. *The Law of Bone Remodelling*. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: Springer-Verlag.
- Wong, M., and D. R. Carter. 2003. "Articular cartilage functional histomorphology and mechanobiology: a research perspective." *Bone* 33 (1):1-13. doi: 10.1016/s8756-3282(03)00083-8.
- Zeder, Melinda A. 2005. "A View from the Zagros: new perspectives on livestock domestication in the Fertile Crescent." In *The First Steps of Animal Domestication: New archaeological approaches*, edited by J. D. Vigne, J. Peters and D. Helmer, 125-146. Oxford: Oxbow Books.
- Zeder, Melinda A., Ximena Lemoine, and Sebastian Payne. 2015. "A new system for computing long-bone fusion age profiles in *Sus scrofa*." *Journal of Archaeological Science* 55:135-150. doi: 10.1016/j.jas.2014.12.017.



Zwicker, Bettina, Lorenz Gygax, Beat Wechsler, and Roland Weber. 2012. "Influence of the accessibility of straw in racks on exploratory behaviour in finishing pigs." *Livestock Science* 148:67-73. doi: 10.1016/j.livsci.2012.05.008.

Annexe 1. Résultats du test de T par échantillons en paires.

**Paired Samples Test**

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	S01 - S01B	0.06778	0.36808	0.07084	-0.07783	0.21338	0.957	26	0.347
Pair 2	S07 - S07B	0.60370	1.71768	0.33057	-0.07579	1.28320	1.826	26	0.079
Pair 3	S12 - S12B	-0.16074	1.85538	0.35707	-0.89471	0.57322	-0.450	26	0.656
Pair 4	S23 - S23B	0.05407	0.49470	0.09521	-0.14162	0.24977	0.568	26	0.575
Pair 5	P04 - P04B	0.18667	0.48833	0.09398	-0.00651	0.37984	1.986	26	0.058
Pair 6	P11 - P11B	0.15630	0.73752	0.14194	-0.13546	0.44805	1.101	26	0.281
Pair 7	P19 - P19B	0.30074	0.83566	0.16082	-0.02983	0.63132	1.870	26	0.073
Pair 8	P21 - P21B	-0.11926	1.15288	0.22187	-0.57532	0.33680	-0.538	26	0.595
Pair 9	PB03 - PB03B	0.00296	0.78120	0.15034	-0.30607	0.31199	0.020	26	0.984
Pair 10	PB14 - PB14B	-0.03481	0.59739	0.11497	-0.27114	0.20151	-0.303	26	0.764
Pair 11	PB18 - PB18B	-0.14444	0.69564	0.13388	-0.41963	0.13074	-1.079	26	0.291
Pair 12	PB19 - PB19B	-0.19481	0.53973	0.10387	-0.40833	0.01870	-1.876	26	0.072

## Annexe 2. Test de normalité des mesure linéaires.

### Tests of Normality

Group		Kolmogorov-Smirnov a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
1,00	LATLEN1	0.091	25	,200*	0.980	25	0.892
	MEDLEN2	0.159	25	0.103	0.946	25	0.204
	TIRTMLT3	0.202	25	0.010	0.725	25	0.000
	TALRML9	0.092	25	,200*	0.975	25	0.768
	TALAP11	0.149	25	0.156	0.946	25	0.199
	PCFML18	0.078	25	,200*	0.980	25	0.878
	LCFDSI26	0.116	25	,200*	0.955	25	0.327
2,00	LATLEN1	0.095	28	,200*	0.976	28	0.748
	MEDLEN2	0.104	28	,200*	0.969	28	0.553
	TIRTMLT3	0.092	28	,200*	0.979	28	0.820
	TALRML9	0.195	28	0.008	0.914	28	0.025
	TALAP11	0.152	28	0.098	0.963	28	0.403
	PCFML18	0.099	28	,200*	0.976	28	0.759
	LCFDSI26	0.162	28	0.059	0.899	28	0.011
3,00	LATLEN1	0.085	21	,200*	0.971	21	0.752
	MEDLEN2	0.128	21	,200*	0.958	21	0.486
	TIRTMLT3	0.173	21	0.103	0.930	21	0.135
	TALRML9	0.125	21	,200*	0.968	21	0.681
	TALAP11	0.089	21	,200*	0.976	21	0.862
	PCFML18	0.106	21	,200*	0.967	21	0.671
	LCFDSI26	0.137	21	,200*	0.937	21	0.190

\*. This is a lower bound of the true significance.

#### a. Lilliefors Significance Correction

Les variables en rouges sont éliminées puisqu'elles sont significativement anormales ( $p < 0.05$ ) Les variables en jaune possèdent un  $p$  près du seuil de  $p < 0.05$  et sont éliminées pour obtenir des tests du M de Box à  $p > 0.05$  (v. Chapitre 4). Les variables rayées sont les correspondances à celles éliminées précédemment dans un autre groupe.

Annexe 3. Test de normalité des ratios.

Tests of Normality							
Group		Kolmogorov-Smirnov a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
1,00	LENRAT	0.236	25	0.001	0.745	25	0.000
	TATIMLR	0.141	25	,200*	0.846	25	0.001
	TIRTRAT	0.081	25	,200*	0.966	25	0.549
	TARSRAT	0.175	25	0.048	0.928	25	0.080
	TALRAT	0.099	25	,200*	0.964	25	0.493
	TARAT	0.133	25	,200*	0.955	25	0.319
	TIRAT	0.266	25	0.000	0.799	25	0.000
	PCFRAT	0.113	25	,200*	0.976	25	0.786
	PCFRAT2	0.131	25	,200*	0.925	25	0.068
	PCFRAT3	0.131	25	,200*	0.955	25	0.318
	SIRAT	0.151	25	0.147	0.938	25	0.133
	LENRAT3	0.162	25	0.090	0.938	25	0.134
	LENRAT2	0.162	25	0.090	0.938	25	0.134
	TITA1	0.171	25	0.058	0.939	25	0.141
	TITA2	0.194	25	0.016	0.905	25	0.024
	TALRAT2	0.145	25	0.184	0.960	25	0.408
	TIRAT2	0.155	25	0.125	0.917	25	0.043
	PCFCURV4	0.161	25	0.095	0.914	25	0.038
2,00	LENRAT	0.217	28	0.002	0.864	28	0.002
	TATIMLR	0.158	28	0.070	0.948	28	0.180
	TIRTRAT	0.158	28	0.070	0.948	28	0.180
	TARSRAT	0.112	28	,200*	0.968	28	0.535
	TALRAT	0.136	28	0.200	0.954	28	0.248
	TARAT	0.115	28	,200*	0.966	28	0.475
	TIRAT	0.155	28	0.083	0.899	28	0.011
	PCFRAT	0.121	28	,200*	0.972	28	0.629
	PCFRAT21	0.098	28	,200*	0.980	28	0.854
	PCFRAT3	0.107	28	,200*	0.959	28	0.338

	SIRAT	0.120	28	,200*	0.971	28	0.599
	LENRAT3	0.371	28	0.000	0.468	28	0.000
	LENRAT2	0.371	28	0.000	0.468	28	0.000
	TITA1	0.114	28	,200*	0.957	28	0.288
	TITA2	0.207	28	0.003	0.922	28	0.038
	TALRAT2	0.133	28	,200*	0.932	28	0.070
	TIRAT2	0.331	28	0.000	0.512	28	0.000
	PCFCURV4	0.191	28	0.010	0.806	28	0.000
3,00	LENRAT	0.109	21	,200*	0.971	21	0.759
	TATIMLR	0.112	21	,200*	0.975	21	0.834
	TIRTRAT	0.112	21	,200*	0.975	21	0.834
	TARSRAT	0.148	21	,200*	0.928	21	0.123
	TALRAT	0.122	21	,200*	0.954	21	0.400
	TARAT	0.103	21	,200*	0.961	21	0.545
	TIRAT	0.122	21	,200*	0.978	21	0.891
	PCFRAT	0.171	21	0.110	0.927	21	0.123
	PCFRAT2	0.128	21	,200*	0.961	21	0.536
	PCFRAT3	0.140	21	,200*	0.951	21	0.350
	SIRAT	0.170	21	0.117	0.944	21	0.257
	LENRAT3	0.293	21	0.000	0.809	21	0.001
	LENRAT	0.293	21	0.000	0.809	21	0.001
	TITA1	0.205	21	0.021	0.950	21	0.345
	TITA2	0.185	21	0.060	0.962	21	0.552
	TALRAT2	0.202	21	0.025	0.936	21	0.186
	TIRAT2	0.161	21	0.161	0.956	21	0.437
	PCFCURV4	0.121	21	,200*	0.956	21	0.435

\*. This is a lower bound of the true significance.

#### a. Lilliefors Significance Correction

Les variables en rouges sont éliminées puisqu'elles sont significativement anormales ( $p < 0.05$ ) Les variables en jaune possèdent un  $p$  près du seuil de  $p < 0.05$  et sont éliminées pour obtenir des tests du M de Box à  $p > 0.05$  (v. Chapitre 4). Les variables rayées sont les correspondances à celles éliminées précédemment dans un autre groupe.

Annexe 4. Test de normalité des ratios identifiés par Bishop.

Tests of Normality							
Group		Kolmogorov-Smirnov a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	Df	Sig.	Statistic	df	Sig.
1,00	<b>TATIMLR</b>	<b>0.141</b>	<b>25</b>	<b>,200*</b>	<b>0.846</b>	<b>25</b>	<b>0.001</b>
	TIRTRAT	0.081	25	,200*	0.966	25	0.549
	PCFRAT	0.113	25	,200*	0.976	25	0.786
	<b>PCFRAT2</b>	<b>0.131</b>	<b>25</b>	<b>,200*</b>	<b>0.925</b>	<b>25</b>	<b>0.068</b>
	PCFRAT3	0.131	25	,200*	0.955	25	0.318
	<b>MLRAT</b>	<b>0.163</b>	<b>25</b>	<b>0.087</b>	<b>0.854</b>	<b>25</b>	<b>0.002</b>
	TTRAT	0.106	25	,200*	0.953	25	0.295
	TITA1	0.171	25	0.058	0.939	25	0.141
	<b>TITA2</b>	<b>0.194</b>	<b>25</b>	<b>0.016</b>	<b>0.905</b>	<b>25</b>	<b>0.024</b>
2,00	TATIMLR	0.158	28	0.070	0.948	28	0.180
	TIRTRAT	0.158	28	0.070	0.948	28	0.180
	PCFRAT	0.121	28	,200*	0.972	28	0.629
	PCFRAT2	0.098	28	,200*	0.980	28	0.854
	PCFRAT3	0.107	28	,200*	0.959	28	0.338
	<b>MLRAT</b>	<b>0.146</b>	<b>28</b>	<b>0.132</b>	<b>0.915</b>	<b>28</b>	<b>0.027</b>
	TTRAT2	0.088	28	,200*	0.984	28	0.932
	TITA1	0.114	28	,200*	0.957	28	0.288
	<b>TITA2</b>	<b>0.207</b>	<b>28</b>	<b>0.003</b>	<b>0.922</b>	<b>28</b>	<b>0.038</b>
3,00	TATIMLR	0.112	21	,200*	0.975	21	0.834
	TIRTRAT	0.112	21	,200*	0.975	21	0.834
	PCFRAT	0.171	21	0.110	0.927	21	0.123
	PCFRAT2	0.128	21	,200*	0.961	21	0.536
	PCFRAT3	0.140	21	,200*	0.951	21	0.350
	MLRAT	0.161	21	0.160	0.929	21	0.130
	TTRAT2	0.075	21	,200*	0.993	21	1.000
	TITA1	0.205	21	0.021	0.950	21	0.345
	<b>TITA2</b>	<b>0.185</b>	<b>21</b>	<b>0.060</b>	<b>0.962</b>	<b>21</b>	<b>0.552</b>
*. This is a lower bound of the true significance.							
a. Lilliefors Significance Correction							

Annexe 5. Tableau d'inventaire.

Spécimen	Latéralité	Taxon	Sexe	Origine	Next Engine	Note
S01	G	Sanglier	F	Ferme Renaissance	✓	
S02	G	Sanglier	F	Ferme Renaissance	✓	
S03	G	Sanglier	F	Ferme Renaissance	✓	
S04	G	Sanglier	F	Ferme Renaissance	✓	
S05	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	Naviculaire et cuboïde fusionnés dorso-postérieurement
S06	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	
S07	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	Naviculaire et cuboïde fusionnés dorso-postérieurement
S08	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	
S09	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	
S10	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	
S11	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	
S12	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	
S13	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	
S14	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	
S15	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	
S16	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	Naviculaire et cuboïde fusionnés dorso-postérieurement
S17	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	
S18	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	Naviculaire et cuboïde fusionnés dorso-postérieurement
S19	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	
S20	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	
S21	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	
S22	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	
S23	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	
S24	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	
S25	G	Sanglier	Ind.	Lait Sangliers des Bois	✓	

Spécimen	Latéralité	Taxon	Sexe	Origine	Next Engine	Note
P01	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P02	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P03	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P04	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P05	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P06	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P07	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P08	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P09	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P10	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P11	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P12	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P13	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P14	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P15	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P16	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P17	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P18	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P19	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	



Spécimen	Latéralité	Taxon	Sexe	Origine	Next Engine	Note
P20	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P21	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P22	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P23	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P24	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P25	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P26	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P27	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
P28	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB01	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB02	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB03	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB04	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB05	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	Naviculaire et cuboïde fusionnés dorso-postérieurement*
PB06	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB07	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB08	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	Phalanges distale et proximale latérales (digit 4) pathologiques (infection + ostéophytes, rigidité articulaire)
PB09	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	

Spécimen	Latéralité	Taxon	Sexe	Origine	Next Engine	Note
PB10	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB11	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB12	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB13	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB14	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB15	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB16	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB17	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB18	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB19	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB20	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	
PB21	D	Porc Yorkshire	Ind.	-	✓	

Annexe 6. Tableau de mesures linéaires prises au pied à coulisse sur les astragales de sangliers élevés au Québec en 2015. Mesures en mm.

Spéci men	LATL EN (1)	MEDL EN (2)	TIRT MLT (3)	TIRT MLL (4)	TIRT MLM (5)	TARS MLT (6)	TARS MLL (7)	TARS MLM (8)	TALR ML (9)	TARM ML (10)	TALA P (11)	TAMA P (12)	TIMA P (13)	TILAP (14)	TICA P (15)	PCFL AP (16)	PCFM AP (17)	PCFM L (18)	MAX ML (19)	MAXS I (20)	MAXL EN (21)	MINL EN (22)	LCFP AP (23)	LCFP SI (24)	LCFD AP (25)	LCFD SI (26)	TUBT IBA (27)	2RCP S
S01	43.54	38.94	21.20	11.00	10.20	25.12	13.50	11.62	8.88	4.62	21.22	15.90	27.62	25.42	15.55	25.24	22.52	17.06	25.74	22.80	43.54	34.26	22.94	16.88	9.52	10.32	18.40	30.46
S02	44.46	37.12	26.46	13.26	13.20	25.12	14.30	10.82	9.78	4.52	20.86	16.38	29.12	28.30	18.44	25.66	22.64	16.60	26.86	24.24	44.46	34.44	24.70	19.20	7.92	9.62	19.60	33.05
S03	43.96	40.22	21.40	12.08	9.32	23.70	14.28	9.42	8.92	5.36	20.94	16.08	28.04	26.00	15.36	25.42	21.38	17.46	24.80	23.10	43.96	34.84	24.66	17.12	8.80	10.00	17.64	31.51
S04	45.90	40.68	22.02	12.08	9.94	25.88	14.42	11.46	10.32	4.10	23.02	17.08	29.56	27.30	18.56	26.44	22.74	17.24	21.56	23.24	45.90	36.80	26.04	18.16	8.26	12.14	19.72	35.26
S05	42.76	40.16	21.26	11.56	9.70	23.42	13.94	9.48	9.44	4.50	21.70	16.72	24.92	24.02	15.16	26.66	22.96	17.30	24.04	23.80	42.76	35.32	23.34	16.50	18.04	10.76	18.28	31.72
S06	43.28	39.70	20.64	11.12	9.52	22.76	13.14	9.62	9.20	3.94	20.14	15.12	25.30	24.38	14.98	25.02	20.50	16.96	24.24	23.34	43.28	34.78	23.64	16.56	9.18	9.38	17.00	31.67
S07	43.90	40.76	21.22	11.40	9.82	23.86	13.74	10.12	9.14	4.60	21.12	15.40	26.90	26.72	14.92	26.48	21.06	17.52	25.26	24.96	43.90	35.40	23.56	19.22	18.24	11.82	18.06	32.97
S08	44.54	41.34	21.56	11.30	10.26	24.48	14.10	10.38	9.04	5.06	21.06	16.10	22.22	21.30	14.66	25.50	19.72	17.76	25.26	24.58	44.54	35.30	24.42	18.16	9.68	10.90	18.92	33.80
S09	42.66	39.92	20.58	11.46	9.12	22.10	11.82	10.28	8.60	3.22	19.90	16.00	26.80	26.18	15.44	24.38	22.10	16.78	23.08	22.74	42.66	34.78	23.80	17.60	9.50	11.10	18.32	29.41
S10	43.16	40.50	20.44	11.34	9.10	22.56	12.58	9.98	8.80	3.78	20.16	15.54	26.64	24.06	15.80	24.68	22.20	15.94	23.90	22.88	43.16	35.46	24.14	16.20	9.30	9.86	17.60	30.74
S11	40.20	37.76	20.64	11.84	8.80	22.36	12.88	9.48	8.00	4.88	19.44	15.18	24.50	23.56	14.10	22.48	18.88	16.70	23.70	22.32	40.20	32.06	22.04	16.20	8.60	9.78	16.64	29.53
S12	43.52	40.60	21.68	12.48	9.20	23.36	13.58	9.78	9.60	3.98	20.52	16.70	26.98	25.14	16.50	25.30	22.82	16.34	24.14	23.48	43.52	35.20	23.90	17.58	9.08	10.18	17.64	31.70
S13	42.96	40.12	20.58	11.76	8.82	23.00	13.30	9.70	9.60	3.70	19.62	15.94	25.74	24.14	15.26	23.62	19.86	15.48	23.10	23.54	42.96	34.44	23.30	15.84	8.16	9.96	18.48	30.93
S14	40.92	37.52	20.30	11.08	9.22	23.22	13.18	10.04	9.30	3.88	19.96	15.08	24.54	23.68	13.56	24.12	20.82	16.88	23.80	22.62	40.92	32.54	22.50	16.86	7.84	10.22	17.68	31.09
S15	41.88	39.04	20.26	11.62	8.64	23.24	13.52	9.72	8.32	5.20	20.14	15.98	21.42	23.70	14.52	25.06	20.96	17.10	24.90	24.16	41.88	33.70	22.40	15.70	9.60	10.64	17.68	30.22
S16	41.40	38.54	19.34	10.82	8.52	22.86	13.26	9.60	8.72	4.54	19.40	15.38	25.34	23.36	14.16	24.22	21.00	15.92	23.26	23.28	41.40	33.66	22.26	15.84	9.52	10.30	16.68	29.69
S17	43.54	41.24	20.82	11.50	9.32	23.58	13.08	10.50	9.04	4.04	19.64	16.32	27.30	24.48	16.28	24.92	21.60	17.22	24.34	24.34	43.54	36.04	23.72	16.80	9.20	9.90	17.82	31.12
S18	45.50	41.42	22.12	12.48	9.64	26.38	14.10	12.28	9.66	4.44	22.02	17.90	27.26	25.50	15.46	27.26	22.50	18.46	26.86	24.32	45.50	36.88	24.36	17.98	10.06	11.02	18.74	33.63
S19	42.52	40.00	21.16	11.18	9.98	23.58	13.58	10.00	9.32	4.26	19.74	16.26	21.70	23.28	15.80	24.46	21.38	17.48	24.44	22.68	42.52	34.58	23.46	16.58	10.30	10.54	16.72	32.18
S20	42.62	39.92	21.18	12.24	8.94	24.80	13.44	11.36	9.06	4.38	20.70	16.90	25.58	24.64	14.38	25.64	21.78	18.46	26.54	23.38	42.62	35.08	23.44	17.00	9.10	10.62	18.10	31.62
S21	41.82	38.50	20.68	10.92	9.76	24.50	13.84	10.66	8.98	4.86	20.16	15.80	25.74	22.88	13.10	25.04	20.88	17.08	25.32	23.36	41.82	33.18	22.66	16.44	8.44	10.18	17.54	30.91
S22	42.22	40.04	20.80	11.08	9.72	22.80	13.20	9.60	8.64	4.56	19.62	15.90	25.72	24.62	15.08	24.46	21.50	16.90	23.66	22.08	42.22	34.36	23.54	17.36	9.64	10.48	16.34	29.97
S23	42.30	39.36	21.72	12.34	9.38	25.38	14.72	10.66	10.28	4.44	20.38	16.96	27.04	24.80	14.56	24.34	19.62	17.76	26.14	23.58	42.30	34.04	23.44	17.26	8.28	9.90	18.00	32.24
S24	40.16	37.92	19.18	10.34	8.84	23.24	13.24	10.00	8.38	4.86	19.02	15.12	24.04	22.96	13.28	24.36	20.40	16.44	23.86	22.24	40.16	32.60	21.48	16.90	8.04	11.00	16.86	30.59
S25	43.20	39.74	20.46	11.50	8.96	24.78	14.12	10.66	10.20	3.92	21.16	15.70	21.48	23.90	14.90	26.16	22.24	17.82	25.74	23.58	43.20	34.72	23.10	17.08	8.84	11.52	17.36	32.89

Annexe 7. Tableau de mesures linéaires prises au pied à coulisse sur les astragales de porcs dits conventionnels élevés au Québec en 2015. Mesures en mm.

Spéci men	LATL EN (1)	MEDL EN (2)	TIRT MLT (3)	TIRT MLL (4)	TIRT MLM (5)	TARS MLT (6)	TARS MLL (7)	TARS MLM (8)	TALR ML (9)	TARM ML (10)	TALA P (11)	TAMA P (12)	TIMA P (13)	TILAP (14)	TICA P (15)	PCFL AP (16)	PCFM AP (17)	PCFM L (18)	MAX ML (19)	MAXS I (20)	MAXL EN (21)	MINL EN (22)	LCFP AP (23)	LCFP SI (24)	LCFD AP (25)	LCFD SI (26)	TUBT IBA (27)	2RCP S
P01	54.90	48.62	31.48	16.10	15.38	33.64	19.32	14.32	11.90	7.42	26.20	25.06	38.30	35.80	25.74	30.24	24.42	21.74	33.60	30.88	54.90	44.22	32.04	26.20	11.26	13.80	25.84	48.19
P02	53.36	47.54	29.80	16.42	13.38	33.70	21.44	12.26	14.60	6.84	30.00	25.62	35.86	35.18	23.90	29.10	27.98	21.74	34.36	30.76	53.36	42.14	31.04	21.78	14.70	14.24	24.22	45.81
P03	58.50	51.04	33.40	17.56	15.84	35.40	23.44	11.96	14.40	9.04	29.84	25.48	38.32	38.18	25.80	30.86	27.96	24.96	36.30	33.32	58.50	46.34	34.28	25.60	13.94	16.90	25.12	46.12
P04	57.08	49.04	30.72	16.24	14.48	35.12	20.78	14.34	14.40	6.38	30.08	23.62	37.80	35.42	24.80	32.76	25.66	22.38	35.34	31.12	57.08	45.28	32.16	26.48	13.78	16.00	22.70	47.66
P05	52.84	48.00	30.00	15.74	14.26	31.94	18.30	13.64	11.38	6.92	26.84	21.36	36.10	32.38	22.66	29.60	24.94	21.80	32.16	29.56	52.84	42.06	29.46	24.58	12.48	14.98	23.06	40.25
P06	53.16	47.50	30.26	15.74	14.52	33.14	17.66	15.48	11.04	6.62	25.42	23.90	35.78	34.20	23.18	29.18	22.70	22.16	33.28	29.70	53.16	42.30	30.78	26.14	12.88	19.58	24.16	45.01
P07	62.02	51.94	32.74	18.18	14.56	35.80	21.00	14.80	13.40	7.60	33.30	25.64	41.12	39.98	26.76	34.26	28.58	23.28	36.16	35.90	62.02	49.68	36.52	28.56	14.60	15.60	29.14	51.12
P08	57.04	51.32	30.54	16.94	13.60	35.10	20.76	14.34	14.40	6.36	26.94	23.98	36.94	36.46	23.84	32.48	28.28	22.76	35.04	34.60	57.04	45.56	32.52	26.62	12.60	13.78	25.42	44.72
P09	59.30	50.98	33.08	18.36	14.72	35.20	23.16	12.04	14.52	8.64	29.10	25.24	38.44	35.82	25.32	31.26	22.34	23.48	35.00	32.64	59.30	47.44	31.72	27.06	13.78	16.88	26.72	45.89
P10	57.04	50.08	32.10	17.76	14.34	34.50	21.46	13.04	14.60	6.86	30.72	23.58	38.28	35.84	26.18	32.28	27.26	21.60	36.42	32.60	57.04	45.90	32.98	28.20	14.40	14.90	26.00	48.07
P11	55.84	51.38	30.04	16.00	14.04	34.08	18.92	15.16	10.02	8.90	28.14	24.36	38.22	34.40	23.88	31.26	24.60	23.38	34.40	31.96	55.84	44.86	31.26	26.20	13.46	15.08	25.44	44.93
P12	56.64	50.40	31.42	17.16	14.26	33.76	20.82	12.94	14.60	6.22	28.98	24.28	38.46	37.58	25.40	33.34	23.22	23.06	34.56	31.30	56.64	44.56	33.08	28.22	11.56	16.34	21.76	60.99
P13	59.02	52.12	31.80	17.10	14.70	35.40	19.24	16.16	12.80	6.44	29.96	24.42	37.86	37.94	24.74	31.60	23.20	22.02	31.28	33.44	59.02	47.60	33.30	27.04	13.30	15.98	27.32	48.77
P14	53.16	47.42	29.02	15.36	13.66	31.98	18.66	13.32	11.52	7.14	27.16	22.60	34.20	31.66	21.54	30.30	25.04	22.44	32.78	29.12	53.16	42.32	29.56	23.24	12.74	14.58	21.70	42.04
P15	57.74	51.14	31.06	18.20	12.86	33.84	21.14	12.70	12.74	8.40	29.46	24.82	40.14	36.00	26.16	28.08	22.60	22.02	35.70	30.62	57.74	46.32	32.00	26.78	13.80	15.66	24.38	51.63
P16	56.06	54.70	30.10	16.40	13.70	34.28	22.16	12.12	13.44	8.72	27.82	27.70	37.14	36.22	27.68	32.60	27.22	23.22	35.62	32.54	56.06	45.84	32.08	26.10	12.80	15.22	24.16	43.65
P17	52.32	46.18	29.62	16.48	13.14	32.64	17.86	14.78	11.82	6.04	25.20	22.24	35.06	33.62	23.48	28.24	22.62	20.48	32.84	27.80	52.32	40.06	30.88	24.06	11.12	14.62	22.98	44.11
P18	54.90	49.36	30.12	16.52	13.60	33.36	20.68	12.68	13.02	7.66	29.16	24.48	32.12	34.26	25.26	31.06	27.58	22.28	33.14	30.78	54.90	44.74	30.90	24.56	13.16	16.20	23.82	48.75
P19	58.54	52.14	31.26	17.88	13.38	35.80	22.30	13.50	14.42	7.88	31.84	25.88	39.16	35.48	23.70	31.82	28.78	24.54	36.70	34.02	58.54	45.48	32.66	26.90	13.96	15.18	25.38	46.14
P20	54.82	50.58	31.82	18.58	13.24	32.54	19.76	12.78	12.20	7.56	29.90	26.02	32.26	35.96	25.36	34.20	29.66	22.82	32.22	31.36	54.82	44.90	32.12	26.80	11.64	14.64	24.42	49.70
P21	55.70	49.06	30.64	16.96	13.68	33.76	19.70	14.06	12.14	7.56	25.18	23.80	31.48	34.92	24.60	29.86	24.48	22.10	34.90	32.32	55.70	45.30	32.02	26.68	10.34	14.34	24.34	47.60
P22	55.10	48.40	29.76	16.94	12.82	33.06	20.38	12.68	13.12	7.26	29.28	24.82	35.84	34.50	23.12	32.62	28.28	23.22	33.48	30.70	55.10	43.14	30.26	23.92	12.46	15.42	22.50	44.55
P23	59.44	53.04	31.98	17.06	14.92	37.80	22.00	15.80	14.44	7.56	29.28	25.42	41.56	36.46	23.92	32.64	25.94	24.42	38.32	32.28	59.44	45.90	32.76	27.90	13.46	18.44	27.30	47.13
P24	54.56	47.36	32.78	17.30	15.48	34.08	20.90	13.18	13.40	7.50	29.64	25.96	36.22	33.80	23.52	30.26	27.88	23.22	34.80	30.70	54.56	43.16	30.14	24.30	11.48	15.54	23.30	62.24
P25	56.94	48.88	30.28	17.50	12.78	34.68	23.10	11.58	14.86	8.24	28.28	23.46	36.86	35.30	24.74	32.34	26.90	23.12	34.74	31.64	56.94	44.64	30.46	26.42	12.50	16.42	24.46	46.03
P26	55.10	47.64	27.76	14.82	12.94	31.60	18.34	13.26	12.20	6.14	27.42	21.86	35.32	34.08	23.82	27.40	22.16	20.00	32.06	27.74	55.10	43.92	29.34	23.52	12.50	15.54	22.06	44.13
P27	60.56	53.96	31.80	18.42	13.38	35.02	22.54	12.48	14.32	8.22	29.36	24.84	37.20	38.26	25.42	33.32	26.52	21.62	35.42	33.42	60.56	47.98	34.14	27.42	13.84	15.48	26.44	46.45
P28	57.34	51.68	31.38	17.40	13.98	35.36	21.18	14.18	13.70	7.48	30.80	25.22	38.74	36.42	25.18	32.38	26.22	21.10	35.68	32.36	57.34	46.18	32.48	27.24	13.00	15.62	25.50	45.73

Annexe 8. Tableau de mesures linéaires prises au pied à coulisse sur les astragales de porcs biologiques élevés en extérieur au Québec en 2016. Mesures en mm.

Spéci men	LATL EN (1)	MEDL EN (2)	TIRT MLT (3)	TIRT MLL (4)	TIRT MLM (5)	TARS MLT (6)	TARS MLL (7)	TARS MLM (8)	TALR ML (9)	TARM ML (10)	TALA P (11)	TAMA P (12)	TIMA P (13)	TILAP (14)	TICA P (15)	PCFL AP (16)	PCFM AP (17)	PCFM L (18)	MAX ML (19)	MAXS I (20)	MAXL EN (21)	MINL EN (22)	LCFP AP (23)	LCFP SI (24)	LCFD AP (25)	LCFD SI (26)	TUBT IBA (27)	2RCP S
PB01	59.54	54.76	31.40	18.98	12.42	36.36	18.32	18.04	12.56	5.76	28.88	23.88	38.38	38.58	25.22	35.60	30.30	23.46	36.18	31.88	59.54	48.94	36.04	26.34	12.02	18.10	21.30	50.18
PB02	59.72	52.36	28.86	17.12	11.74	36.10	20.98	15.12	14.50	6.48	32.42	23.60	40.90	38.18	27.58	32.06	26.44	23.50	37.52	34.24	59.72	47.90	35.40	29.14	13.74	15.92	26.02	46.77
PB03	55.76	51.76	29.56	16.48	13.08	34.52	19.54	14.98	13.70	5.84	29.42	20.90	38.36	34.40	24.74	29.90	25.04	19.80	34.48	30.60	55.76	45.00	31.24	26.04	13.06	14.28	22.06	41.73
PB04	55.68	51.64	29.24	16.88	12.36	33.70	17.68	16.02	11.78	5.90	30.96	23.26	39.82	34.46	24.68	33.14	27.44	21.00	33.74	31.54	55.68	45.74	31.10	25.24	11.72	14.22	24.26	48.20
PB05	54.26	47.42	27.92	15.56	12.36	34.04	19.62	14.42	12.44	7.18	30.34	23.56	37.98	34.44	25.66	30.46	27.38	21.62	34.78	31.66	54.26	43.28	31.88	24.96	12.22	14.54	24.84	44.60
PB06	52.32	47.84	28.38	15.76	12.62	33.28	17.78	15.50	11.84	5.94	26.56	21.36	35.06	33.62	23.18	26.68	26.32	20.26	33.16	29.76	52.32	42.64	29.82	24.88	12.04	15.96	23.70	43.44
PB07	57.98	53.78	28.88	16.82	12.06	35.22	19.02	16.20	12.74	6.28	28.04	22.34	38.36	34.08	24.10	30.32	26.58	20.70	34.94	31.92	57.98	47.26	29.36	25.80	13.26	15.92	25.08	41.48
PB08	52.58	49.92	28.66	16.82	11.84	34.16	18.84	15.32	12.90	5.94	29.78	20.82	35.62	31.34	21.50	28.22	22.10	21.16	33.88	29.70	52.58	42.46	28.30	25.60	13.00	14.82	22.58	44.46
PB09	56.44	50.40	29.70	17.02	12.68	34.58	17.70	16.88	12.08	5.62	28.80	22.04	37.04	33.70	23.94	30.00	24.84	21.22	34.38	30.72	56.44	44.64	30.54	25.76	13.00	12.88	24.04	42.79
PB10	59.30	54.52	28.12	16.96	11.16	36.50	19.38	17.12	12.48	6.90	30.24	24.44	40.04	36.06	27.42	32.60	27.74	22.14	37.64	31.86	59.30	48.20	32.90	26.06	13.26	13.20	26.38	48.85
PB11	57.56	51.76	28.84	16.30	12.54	34.48	18.16	16.32	11.76	6.40	28.44	23.92	38.82	36.82	26.14	30.08	28.08	21.70	34.40	32.56	57.56	46.46	33.10	27.04	12.32	14.84	24.06	43.12
PB12	52.24	49.54	27.08	14.18	12.90	32.84	16.06	16.78	10.56	5.50	26.70	22.50	36.80	31.64	23.94	28.02	24.10	19.64	32.72	28.90	52.24	43.22	28.30	23.76	12.26	14.40	20.90	43.58
PB13	54.28	49.38	28.38	16.64	11.74	32.20	17.52	14.68	11.88	5.64	27.30	20.28	36.20	33.10	23.50	30.10	27.06	20.00	32.40	29.86	54.28	44.08	30.28	24.60	11.80	14.34	23.34	42.91
PB14	51.08	48.90	27.78	15.90	11.88	34.46	18.30	16.16	12.34	5.96	28.54	22.10	35.70	33.60	23.78	29.66	23.98	18.70	34.56	29.42	51.08	41.60	31.46	25.56	12.14	15.10	22.26	43.83
PB15	57.80	51.74	28.88	16.22	12.66	35.34	18.86	16.48	12.96	5.90	30.52	22.94	37.18	35.18	24.14	30.28	25.00	21.80	35.12	31.82	57.80	46.24	33.10	26.06	12.68	14.94	24.80	43.69
PB16	56.22	49.48	28.06	14.90	13.16	35.08	21.42	13.66	14.94	6.48	29.60	23.08	38.32	35.28	24.76	29.24	28.66	20.30	35.38	31.84	56.22	43.52	31.84	26.54	15.84	12.44	24.06	42.45
PB17	53.84	47.90	27.50	15.90	11.60	32.14	17.84	14.30	13.26	4.58	30.42	23.46	35.90	34.24	21.90	32.46	26.90	18.26	32.90	30.32	53.84	40.52	31.86	24.64	12.26	12.64	23.20	43.22
PB18	54.70	50.32	28.50	16.08	12.42	33.28	18.00	15.28	11.30	6.70	28.68	23.72	37.08	33.56	25.54	30.40	24.62	21.16	33.22	29.96	54.70	44.56	32.60	24.16	13.74	14.86	23.60	44.33
PB19	55.00	49.78	28.76	16.14	12.62	33.86	18.52	15.34	12.52	6.00	29.08	23.54	37.08	34.70	26.10	30.28	29.34	20.34	34.60	30.26	55.00	44.56	31.92	24.88	11.70	14.54	24.14	46.03
PB20	57.14	52.14	29.40	16.10	13.30	34.24	19.98	14.26	14.30	5.68	30.62	21.96	38.36	35.74	23.86	32.14	29.76	20.38	34.64	32.52	57.14	45.28	32.28	27.08	12.58	12.98	26.70	43.55
PB21	55.86	51.94	28.26	15.96	12.30	31.90	19.72	12.18	14.08	5.64	29.58	23.26	38.24	37.10	24.84	31.40	28.68	20.94	36.28	31.66	55.86	45.08	32.76	27.56	12.36	13.72	25.14	46.12

Annexe 9. Tableau des ratios pour les astragales de sangliers élevés au Québec en 2015.

Spéci men	LENRA T (2/1)	TATIM LR (3/6)	TIRTR AT (4/5)	TARSR AT (7/8)	TALRA T (9/10)	TARAT (11/12)	TIRAT (14/13)	PCFRA T (17/16)	PCFRA T2 (18/16)	PCFRA T3 (18/17)	MLRAT (3/19)	SIRAT (14/20)	LENRA T3 (22/21)	LENRA T2 (22/1)	TTRAT (27/15)	TITA1 (14/11)	TITA2 (13/12)	TALRA T2 (9/6)	TIRAT 2 (14/22)	TIRAT 3 (13/22)	PCFC URV(S /16)	PCFC URV2( S/17)	PCFC URV3( S/18)	PCFC URV4( S/20)	PCFC URV5( S/21)	PCFC URV6( S/22)	Group
S01	0.89	0.84	1.08	1.16	1.92	1.33	0.92	0.89	0.68	0.76	0.82	1.11	0.79	0.79	1.18	1.20	1.74	0.35	0.74	0.81	1.21	1.35	1.79	1.34	0.70	0.89	1.00
S02	0.83	1.05	1.00	1.32	2.16	1.27	0.97	0.88	0.65	0.73	0.99	1.17	0.77	0.77	1.06	1.36	1.78	0.39	0.82	0.85	1.29	1.46	1.99	1.36	0.74	0.96	1.00
S03	0.91	0.90	1.30	1.52	1.66	1.30	0.93	0.84	0.69	0.82	0.86	1.13	0.79	0.79	1.15	1.24	1.74	0.38	0.75	0.80	1.24	1.47	1.80	1.36	0.72	0.90	1.00
S04	0.89	0.85	1.22	1.26	2.52	1.35	0.92	0.86	0.65	0.76	1.02	1.17	0.80	0.80	1.06	1.19	1.73	0.40	0.74	0.80	1.33	1.55	2.05	1.52	0.77	0.96	1.00
S05	0.94	0.91	1.19	1.47	2.10	1.30	0.96	0.86	0.65	0.75	0.88	1.01	0.83	0.83	1.21	1.11	1.49	0.40	0.68	0.71	1.19	1.38	1.83	1.33	0.74	0.90	1.00
S06	0.92	0.91	1.17	1.37	2.34	1.33	0.96	0.82	0.68	0.83	0.85	1.04	0.80	0.80	1.13	1.21	1.67	0.40	0.70	0.73	1.27	1.54	1.87	1.36	0.73	0.91	1.00
S07	0.93	0.89	1.16	1.36	1.99	1.37	0.99	0.80	0.66	0.83	0.84	1.07	0.81	0.81	1.21	1.27	1.75	0.38	0.75	0.76	1.25	1.57	1.88	1.32	0.75	0.93	1.00
S08	0.93	0.88	1.10	1.36	1.79	1.31	0.96	0.77	0.70	0.90	0.85	0.87	0.79	0.79	1.29	1.01	1.38	0.37	0.60	0.63	1.33	1.71	1.90	1.38	0.76	0.96	1.00
S09	0.94	0.93	1.26	1.15	2.67	1.24	0.98	0.91	0.69	0.76	0.89	1.15	0.82	0.82	1.19	1.32	1.68	0.39	0.75	0.77	1.21	1.33	1.75	1.29	0.69	0.85	1.00
S10	0.94	0.91	1.25	1.26	2.33	1.30	0.90	0.90	0.65	0.72	0.86	1.05	0.82	0.82	1.11	1.19	1.71	0.39	0.68	0.75	1.25	1.38	1.93	1.34	0.71	0.87	1.00
S11	0.94	0.92	1.35	1.36	1.64	1.28	0.96	0.84	0.74	0.88	0.87	1.06	0.80	0.80	1.18	1.21	1.61	0.36	0.73	0.76	1.31	1.56	1.77	1.32	0.73	0.92	1.00
S12	0.93	0.93	1.36	1.39	2.41	1.23	0.93	0.90	0.65	0.72	0.90	1.07	0.81	0.81	1.07	1.23	1.62	0.41	0.71	0.77	1.25	1.39	1.94	1.35	0.73	0.90	1.00
S13	0.93	0.89	1.33	1.37	2.59	1.23	0.94	0.84	0.66	0.78	0.89	1.03	0.80	0.80	1.21	1.23	1.61	0.42	0.70	0.75	1.31	1.56	2.00	1.31	0.72	0.90	1.00
S14	0.92	0.87	1.20	1.31	2.40	1.32	0.96	0.86	0.70	0.81	0.85	1.05	0.80	0.80	1.30	1.19	1.63	0.40	0.73	0.75	1.29	1.49	1.84	1.37	0.76	0.96	1.00
S15	0.93	0.87	1.34	1.39	1.60	1.26	1.11	0.84	0.68	0.82	0.81	0.98	0.80	0.80	1.22	1.18	1.34	0.36	0.70	0.64	1.21	1.44	1.77	1.25	0.72	0.90	1.00
S16	0.93	0.85	1.27	1.38	1.92	1.26	0.92	0.87	0.66	0.76	0.83	1.00	0.81	0.81	1.18	1.20	1.65	0.38	0.69	0.75	1.23	1.41	1.86	1.28	0.72	0.88	1.00
S17	0.95	0.88	1.23	1.25	2.24	1.20	0.90	0.87	0.69	0.80	0.86	1.01	0.83	0.83	1.09	1.25	1.67	0.38	0.68	0.76	1.25	1.44	1.81	1.28	0.71	0.86	1.00
S18	0.91	0.84	1.29	1.15	2.18	1.23	0.94	0.83	0.68	0.82	0.82	1.05	0.81	0.81	1.21	1.16	1.52	0.37	0.69	0.74	1.23	1.49	1.82	1.38	0.74	0.91	1.00
S19	0.94	0.90	1.12	1.36	2.19	1.21	1.07	0.87	0.71	0.82	0.87	1.03	0.81	0.81	1.06	1.18	1.33	0.40	0.67	0.63	1.32	1.51	1.84	1.42	0.76	0.93	1.00
S20	0.94	0.85	1.37	1.18	2.07	1.22	0.96	0.85	0.72	0.85	0.80	1.05	0.82	0.82	1.26	1.19	1.51	0.37	0.70	0.73	1.23	1.45	1.71	1.35	0.74	0.90	1.00
S21	0.92	0.84	1.12	1.30	1.85	1.28	0.89	0.83	0.68	0.82	0.82	0.98	0.79	0.79	1.34	1.13	1.63	0.37	0.69	0.78	1.23	1.48	1.81	1.32	0.74	0.93	1.00
S22	0.95	0.91	1.14	1.38	1.89	1.23	0.96	0.88	0.69	0.79	0.88	1.12	0.81	0.81	1.08	1.25	1.62	0.38	0.72	0.75	1.23	1.39	1.77	1.36	0.71	0.87	1.00
S23	0.93	0.86	1.32	1.38	2.32	1.20	0.92	0.81	0.73	0.91	0.83	1.05	0.80	0.80	1.24	1.22	1.59	0.41	0.73	0.79	1.32	1.64	1.82	1.37	0.76	0.95	1.00
S24	0.94	0.83	1.17	1.32	1.72	1.26	0.96	0.84	0.67	0.81	0.80	1.03	0.81	0.81	1.27	1.21	1.59	0.36	0.70	0.74	1.26	1.50	1.86	1.38	0.76	0.94	1.00
S25	0.92	0.83	1.28	1.32	2.60	1.35	1.11	0.85	0.68	0.80	0.79	1.01	0.80	0.80	1.17	1.13	1.37	0.41	0.69	0.62	1.26	1.48	1.85	1.39	0.76	0.95	1.00

Annexe 10. Tableau des ratios pour les astragales de porcs dits conventionnels élevés au Québec en 2015.

Spéci men	LENRA T (2/1)	TATIM LR (3/6)	TIRTR AT (4/5)	TARSR AT (7/8)	TALRA T (9/10)	TARAT (11/12)	TIRAT (14/13)	PCFRA T (17/16)	PCFRA T2 (18/16)	PCFRA T3 (18/17)	MLRAT (3/19)	SIRAT (14/20)	LENRA T3 (22/21)	LENRA T2 (22/1)	TTRAT (27/15)	TITA1 (14/11)	TITA2 (13/12)	TALRA T2 (9/6)	TIRAT 2 (14/22)	TIRAT 3 (13/22)	PCFC URV	PCFC URV2( S/17)	PCFC URV3( S/18)	PCFC URV4( S/20)	PCFC URV5( S/21)	PCFC URV6( S/22)	Group
P01	0.89	2.05	1.05	1.35	1.60	1.05	0.93	0.81	0.72	0.89	0.94	1.16	0.81	0.81	1.00	1.37	1.53	0.35	0.81	0.87	1.59	1.97	2.22	1.56	0.88	1.09	2.00
P02	0.89	2.23	1.23	1.75	2.13	1.17	0.98	0.96	0.75	0.78	0.87	1.14	0.79	0.79	1.01	1.17	1.40	0.43	0.83	0.85	1.57	1.64	2.11	1.49	0.86	1.09	2.00
P03	0.87	2.11	1.11	1.96	1.59	1.17	1.00	0.91	0.81	0.89	0.92	1.15	0.79	0.79	0.97	1.28	1.50	0.41	0.82	0.83	1.49	1.65	1.85	1.38	0.79	1.00	2.00
P04	0.86	2.12	1.12	1.45	2.26	1.27	0.94	0.78	0.68	0.87	0.87	1.14	0.79	0.79	0.92	1.18	1.60	0.41	0.78	0.83	1.45	1.86	2.13	1.53	0.83	1.05	2.00
P05	0.91	2.10	1.10	1.34	1.64	1.26	0.90	0.84	0.74	0.87	0.93	1.10	0.80	0.80	1.02	1.21	1.69	0.36	0.77	0.86	1.36	1.61	1.85	1.36	0.76	0.96	2.00
P06	0.89	2.08	1.08	1.14	1.67	1.06	0.96	0.78	0.76	0.98	0.91	1.15	0.80	0.80	1.04	1.35	1.50	0.33	0.81	0.85	1.54	1.98	2.03	1.52	0.85	1.06	2.00
P07	0.84	2.25	1.25	1.42	1.76	1.30	0.97	0.83	0.68	0.81	0.91	1.11	0.80	0.80	1.09	1.20	1.60	0.37	0.80	0.83	1.49	1.79	2.20	1.42	0.82	1.03	2.00
P08	0.90	2.25	1.25	1.45	2.26	1.12	0.99	0.87	0.70	0.80	0.87	1.05	0.57	0.57	1.07	1.35	1.54	0.41	1.12	1.14	1.38	1.58	1.96	1.29	0.78	0.98	2.00
P09	0.86	2.25	1.25	1.92	1.68	1.15	0.93	0.71	0.75	1.05	0.95	1.10	0.80	0.80	1.06	1.23	1.52	0.41	0.76	0.81	1.47	2.05	1.95	1.41	0.77	0.97	2.00
P10	0.88	2.24	1.24	1.65	2.13	1.30	0.94	0.84	0.67	0.79	0.88	1.10	0.80	0.80	0.99	1.17	1.62	0.42	0.78	0.83	1.49	1.76	2.23	1.47	0.84	1.05	2.00
P11	0.92	2.14	1.14	1.25	1.13	1.16	0.90	0.79	0.75	0.95	0.87	1.08	0.80	0.80	1.07	1.22	1.57	0.29	0.77	0.85	1.44	1.83	1.92	1.41	0.80	1.00	2.00
P12	0.89	2.20	1.20	1.61	2.35	1.19	0.98	0.70	0.69	0.99	0.91	1.20	0.79	0.79	0.86	1.30	1.58	0.43	0.84	0.86	1.83	2.63	2.64	1.95	1.08	1.37	2.00
P13	0.88	2.16	1.16	1.19	1.99	1.23	1.00	0.73	0.70	0.95	1.02	1.13	0.81	0.81	1.10	1.27	1.55	0.36	0.80	0.80	1.54	2.10	2.22	1.46	0.83	1.02	2.00
P14	0.89	2.12	1.12	1.40	1.61	1.20	0.93	0.83	0.74	0.90	0.89	1.09	0.80	0.80	1.01	1.17	1.51	0.36	0.75	0.81	1.39	1.68	1.87	1.44	0.79	0.99	2.00
P15	0.89	2.42	1.42	1.66	1.52	1.19	0.90	0.80	0.78	0.97	0.87	1.18	0.80	0.80	0.93	1.22	1.62	0.38	0.78	0.87	1.84	2.28	2.34	1.69	0.89	1.11	2.00
P16	0.98	2.20	1.20	1.83	1.54	1.00	0.98	0.83	0.71	0.85	0.85	1.11	0.82	0.82	0.87	1.30	1.34	0.39	0.79	0.81	1.34	1.60	1.88	1.34	0.78	0.95	2.00
P17	0.88	2.25	1.25	1.21	1.96	1.13	0.96	0.80	0.73	0.91	0.90	1.21	0.77	0.77	0.98	1.33	1.58	0.36	0.84	0.88	1.56	1.95	2.15	1.59	0.84	1.10	2.00
P18	0.90	2.21	1.21	1.63	1.70	1.19	1.07	0.89	0.72	0.81	0.91	1.11	0.81	0.81	0.94	1.17	1.31	0.39	0.77	0.72	1.57	1.77	2.19	1.58	0.89	1.09	2.00
P19	0.89	2.34	1.34	1.65	1.83	1.23	0.91	0.90	0.77	0.85	0.85	1.04	0.78	0.78	1.07	1.11	1.51	0.40	0.78	0.86	1.45	1.60	1.88	1.36	0.79	1.01	2.00
P20	0.92	2.40	1.40	1.55	1.61	1.15	1.11	0.87	0.67	0.77	0.99	1.15	0.82	0.82	0.96	1.20	1.24	0.37	0.80	0.72	1.45	1.68	2.18	1.58	0.91	1.11	2.00
P21	0.88	2.24	1.24	1.40	1.61	1.06	1.11	0.82	0.74	0.90	0.88	1.08	0.81	0.81	0.99	1.39	1.32	0.36	0.77	0.69	1.59	1.94	2.15	1.47	0.85	1.05	2.00
P22	0.88	2.32	1.32	1.61	1.81	1.18	0.96	0.87	0.71	0.82	0.89	1.12	0.78	0.78	0.97	1.18	1.44	0.40	0.80	0.83	1.37	1.58	1.92	1.45	0.81	1.03	2.00
P23	0.89	2.14	1.14	1.39	1.91	1.15	0.88	0.79	0.75	0.94	0.83	1.13	0.77	0.77	1.14	1.25	1.63	0.38	0.79	0.91	1.44	1.82	1.93	1.46	0.79	1.03	2.00
P24	0.87	2.12	1.12	1.59	1.79	1.14	0.93	0.92	0.77	0.83	0.94	1.10	0.79	0.79	0.99	1.14	1.40	0.39	0.78	0.84	2.06	2.23	2.68	2.03	1.14	1.44	2.00
P25	0.86	2.37	1.37	1.99	1.80	1.21	0.96	0.83	0.71	0.86	0.87	1.12	0.53	0.53	0.99	1.25	1.57	0.43	1.16	1.21	1.42	1.71	1.99	1.45	0.81	1.03	2.00
P26	0.86	2.15	1.15	1.38	1.99	1.25	0.96	0.81	0.73	0.90	0.87	1.23	0.80	0.80	0.93	1.24	1.62	0.39	0.78	0.80	1.61	1.99	2.21	1.59	0.80	1.00	2.00
P27	0.89	2.38	1.38	1.81	1.74	1.18	1.03	0.80	0.65	0.82	0.90	1.14	0.79	0.79	1.04	1.30	1.50	0.41	0.80	0.78	1.39	1.75	2.15	1.39	0.77	0.97	2.00
P28	0.90	2.24	1.24	1.49	1.83	1.22	0.94	0.81	0.65	0.80	0.88	1.13	0.81	0.81	1.01	1.18	1.54	0.39	0.79	0.84	1.41	1.74	2.17	1.41	0.80	0.99	2.00

Annexe 11. Tableau des ratios pour les astragales de porcs biologiques élevés au Québec en 2015.

Spéci men	LENRA T (2/1)	TATIM LR (3/6)	TIRTR AT (4/5)	TARSR AT (7/8)	TALRA T (9/10)	TARAT (11/12)	TIRAT (14/13)	PCFRA T (17/16)	PCFRA T2 (18/16)	PCFRA T3 (18/17)	MLRAT (3/19)	SIRAT (14/20)	LENRA T3 (22/21)	LENRA T2 (22/1)	TTRAT (27/15)	TITA1 (14/11)	TITA2 (13/12)	TALRA T2 (9/6)	TIRAT 2 (14/22)	TIRAT 3 (13/22)	PCFC URV(S /16)	PCFC URV2( S/17)	PCFC URV3( S/18)	PCFC URV4( S/20)	PCFC URV5( S/21)	PCFC URV6( S/22)	Group
PB01	0.92	2.53	1.53	1.02	2.18	1.21	1.01	0.85	0.66	0.77	0.87	1.21	0.82	0.82	0.84	1.34	1.61	0.35	0.79	0.78	1.41	1.66	2.14	1.57	0.84	1.03	3.00
PB02	0.88	2.46	1.46	1.39	2.24	1.37	0.93	0.82	0.73	0.89	0.77	1.12	0.80	0.80	0.94	1.18	1.73	0.40	0.80	0.85	1.46	1.77	1.99	1.37	0.78	0.98	3.00
PB03	0.93	2.26	1.26	1.30	2.35	1.41	0.90	0.84	0.66	0.79	0.86	1.12	0.81	0.81	0.89	1.17	1.84	0.40	0.76	0.85	1.40	1.67	2.11	1.36	0.75	0.93	3.00
PB04	0.93	2.37	1.37	1.10	2.00	1.33	0.87	0.83	0.63	0.77	0.87	1.09	0.82	0.82	0.98	1.11	1.71	0.35	0.75	0.87	1.45	1.76	2.30	1.53	0.87	1.05	3.00
PB05	0.87	2.26	1.26	1.36	1.73	1.29	0.91	0.90	0.71	0.79	0.80	1.09	0.80	0.80	0.97	1.14	1.61	0.37	0.80	0.88	1.46	1.63	2.06	1.41	0.82	1.03	3.00
PB06	0.91	2.25	1.25	1.15	1.99	1.24	0.96	0.99	0.76	0.77	0.86	1.13	0.81	0.81	1.02	1.27	1.64	0.36	0.79	0.82	1.63	1.65	2.14	1.46	0.83	1.02	3.00
PB07	0.93	2.39	1.39	1.17	2.03	1.26	0.89	0.88	0.68	0.78	0.83	1.07	0.82	0.82	1.04	1.22	1.72	0.36	0.72	0.81	1.37	1.56	2.00	1.30	0.72	0.88	3.00
PB08	0.95	2.42	1.42	1.23	2.17	1.43	0.88	0.78	0.75	0.96	0.85	1.06	0.81	0.81	1.05	1.05	1.71	0.38	0.74	0.84	1.58	2.01	2.10	1.50	0.85	1.05	3.00
PB09	0.89	2.34	1.34	1.05	2.15	1.31	0.91	0.83	0.71	0.85	0.86	1.10	0.79	0.79	1.00	1.17	1.68	0.35	0.75	0.83	1.43	1.72	2.02	1.39	0.76	0.96	3.00
PB10	0.92	2.52	1.52	1.13	1.81	1.24	0.90	0.85	0.68	0.80	0.75	1.13	0.81	0.81	0.96	1.19	1.64	0.34	0.75	0.83	1.50	1.76	2.21	1.53	0.82	1.01	3.00
PB11	0.90	2.30	1.30	1.11	1.84	1.19	0.95	0.93	0.72	0.77	0.84	1.13	0.81	0.81	0.92	1.29	1.62	0.34	0.79	0.84	1.43	1.54	1.99	1.32	0.75	0.93	3.00
PB12	0.95	2.10	1.10	0.96	1.92	1.19	0.86	0.86	0.70	0.81	0.83	1.09	0.83	0.83	0.87	1.19	1.64	0.32	0.73	0.85	1.56	1.81	2.22	1.51	0.83	1.01	3.00
PB13	0.91	2.42	1.42	1.19	2.11	1.35	0.91	0.90	0.66	0.74	0.88	1.11	0.81	0.81	0.99	1.21	1.79	0.37	0.75	0.82	1.43	1.59	2.15	1.44	0.79	0.97	3.00
PB14	0.96	2.34	1.34	1.13	2.07	1.29	0.94	0.81	0.63	0.78	0.80	1.14	0.81	0.81	0.94	1.18	1.62	0.36	0.81	0.86	1.48	1.83	2.34	1.49	0.86	1.05	3.00
PB15	0.90	2.28	1.28	1.14	2.20	1.33	0.95	0.83	0.72	0.87	0.82	1.11	0.80	0.80	1.03	1.15	1.62	0.37	0.76	0.80	1.44	1.75	2.00	1.37	0.76	0.94	3.00
PB16	0.88	2.13	1.13	1.57	2.31	1.28	0.92	0.98	0.69	0.71	0.79	1.11	0.77	0.77	0.97	1.19	1.66	0.43	0.81	0.88	1.45	1.48	2.09	1.33	0.75	0.98	3.00
PB17	0.89	2.37	1.37	1.25	2.90	1.30	0.95	0.83	0.56	0.68	0.84	1.13	0.75	0.75	1.06	1.13	1.53	0.41	0.85	0.89	1.33	1.61	2.37	1.43	0.80	1.07	3.00
PB18	0.92	2.29	1.29	1.18	1.69	1.21	0.91	0.81	0.70	0.86	0.86	1.12	0.81	0.81	0.92	1.17	1.56	0.34	0.75	0.83	1.46	1.80	2.10	1.48	0.81	0.99	3.00
PB19	0.91	2.28	1.28	1.21	2.09	1.24	0.94	0.97	0.67	0.69	0.83	1.15	0.81	0.81	0.92	1.19	1.58	0.37	0.78	0.83	1.52	1.57	2.26	1.52	0.84	1.03	3.00
PB20	0.91	2.21	1.21	1.40	2.52	1.39	0.93	0.93	0.63	0.68	0.85	1.10	0.79	0.79	1.12	1.17	1.75	0.42	0.79	0.85	1.36	1.46	2.14	1.34	0.76	0.96	3.00
PB21	0.93	2.30	1.30	1.62	2.50	1.27	0.97	0.91	0.67	0.73	0.78	1.17	0.81	0.81	1.01	1.25	1.64	0.44	0.82	0.85	1.47	1.61	2.20	1.46	0.83	1.02	3.00



## Annexe 12. Script R d'identification des variables corrélées.

```
## Clean workspace
rm(list=ls(all=TRUE))
gc(T, verbose=F)

## Install required packages
require(corrplot)
require(fields)
require(data.table)
require(caret)

## Set base directory a changer si necessaire
setwd("~/Desktop/SPSS/TXT")

## Reprendre avec ratios.txt
dat <- read.table("linear.txt", header=TRUE, row.names=1, dec=",")

## View data
summary(dat)
str(dat) # structure**

#### Standardization of predictors
dat1 <- as.data.frame(cbind(dat[,c(1:3)], (scale(dat[, -c(1:3)]))))

# Compute correlations among variables
#####
###
cor.var <- cor(dat1[, -c(1:3)])
corrplot(cor.var, order = "hclust", sig.level = 0.05, tl.cex = .6,
          tl.col = "black", cl.cex = .8)

# Automatic selection with a correlation cutoff value
var.to.remove <- findCorrelation(cor.var, cutoff = .7)
dat2 <- dat1[, -c(4 + var.to.remove)]

nb.var <- length(dat1) - 4
print
```

That's all, folks!